

Bachelor Thesis des Studiengangs
Augenoptik / Augenoptik & Hörakustik

FLORIAN FAULSTICH

Projekt AVATAR

Erstellung eines Programms zur computergesteuerten,
blickwinkelabhängigen Bestimmung der Sehschärfe

Prüfer: Prof. Dr. Peter Baumbach
Zweitprüfer: Prof. Dr. Jürgen Nolting

Projekt AVATAR

Erstellung eines Programms zur computergesteuerten,
blickwinkelabhängigen Bestimmung der Sehschärfe

Zugelassene Abschlussarbeit des Studiengangs Augenoptik / Augenoptik &
Hörakustik zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science

vorgelegt von

Florian Faulstich

Tag der Einreichung

19. Februar 2015

Prüfer

Prof. Dr. Peter Baumbach

Zweitprüfer

Prof. Dr. Jürgen Nolting

Fakultät Augenoptik und Hörakustik

Hochschule Aalen

Teil I.

Präambel

Danksagung

An dieser Stelle sei allen gedankt, die mich bei der Erstellung der Bachelorarbeit und auf meinem bisherigen Werdegang unterstützt haben.

Besonders erwähnt sei hierbei Prof. Dr. Peter Baumbach, der das Thema vergeben und die Arbeit betreut hat. Neben der Unterstützung bei augenoptischen Fragestellungen konnte dieser auch immer wieder wertvolle Hinweise zur Dokumentation und Programmierung in der für mich neuen Programmiersprache c++ geben.

Weiterer Dank gilt Prof. Dr. Michael Bach für die Unterstützung bei Rückfragen zum Funktionsprinzip des FrACT¹ und Prof. Dr. Jürgen Nolting für die Übernahme der Zweitkorrektur.

Vielen Dank für die hilfreichen Tipps und konstruktive Kritik.

Darüber hinaus seien meine Eltern und Geschwister erwähnt, die mich stets sowohl moralisch, als auch finanziell, unterstützt haben. Durch das Gegenlesen der Arbeit konnten sie Schwächen und weitere Perspektiven aufzeigen.

¹ **F**reiburg (visual) **A**cuity & **C**otrast **T**est

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelor Thesis selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine andere als die angegebene Literatur benutzt habe. Alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlehnenden Ausführungen meiner Arbeit sind besonders gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

I. Präambel	III
II. Hauptteil	XI
1. Einleitung	1
1.1. Ziel der Arbeit	2
2. Grundlagen/Theorie	5
2.1. Stärkenverlauf eines Gleitsichtglases und sein Einfluss auf die Sehschärfe	5
2.2. Die Sehschärfe	6
2.3. Der Freiburger Visustest	9
2.4. Darstellbarkeit von Sehzeichen	10
2.5. Die psychometrische Funktion	13
2.6. Möglichkeiten der Ermittlung der Schwelle	14
2.7. Beschreibung von Blickrichtungen	19
2.8. Optimierung der Testdauer	24
3. Das Programm	29
3.1. Benennung des Programms	29
3.2. Die Programmiersprache	29
3.3. Umsetzung im Programm	30
3.4. Benutzeroberfläche/Bedienung	44

4. Messungen	57
4.1. Vergleichsmessungen	57
4.2. Messungen mit Gleitsichtglas	63
5. Schluss	67
III. Anhang	XIII
A. Inhalt der CD	XV
B. Installationsanleitung	XVII
C. Berechnung des Ebenenrasters	XIX
D. Abkürzungen	XXIII
E. Tabellen	XXV
F. Listings	XXIX
Quellen	XXXV
Abbildungsverzeichnis	XXXVIII
Tabellenverzeichnis	XXXIX
Listingverzeichnis	XLI

Teil II.

Hauptteil

1. Einleitung

Üblicherweise findet, im Rahmen der subjektiven Refraktion, eine Bestimmung der Sehschärfe beim Blick durch das Zentrum von Einstärkengläsern statt. Das Ergebnis dieser Messung dient als Entscheidungskriterium bei der Auswahl der Glasstärke der jeweiligen Korrektur. Umgekehrt ist der erzielbare Visus ein wichtiges Maß hinsichtlich der Beurteilung der Qualität einer Sehhilfe.

Da einige der heute verfügbaren Sehhilfen nicht nur eine Stärke besitzen ist es besonders interessant die Sehschärfe nicht nur beim Blick durch das Zentrum des Glases zu beurteilen, sondern unter verschiedenen Blickwinkeln zu ermitteln.

Besondere Aufmerksamkeit gilt hier den Gleitsichtgläsern, die dem presbyopen Träger, durch einen stufenlosen Übergang zwischen Nah- und Fernbereich, scharfes Sehen in allen Zwischenentfernungen ermöglichen. Der hierfür notwendige Stärkenverlauf führt zu Unschärfebereichen im Randbereich des Glases. Auf Grund der Tatsache, dass diese Unschärfebereiche nicht gänzlich entfernt werden können, ihr Verlauf aber durchaus beeinflusst werden kann, existieren heute verschiedene Gleitsichtglasdesigns, die jeweils für bestimmte Anwendungsgebiete (z.B. Arbeitsplatz) optimiert sind.

Der Einfluss von Refraktionsfehlern kann theoretisch ermittelt werden. Wederz (2006) befasst sich in ihrer Arbeit mit dem Einfluss von Änderungen der Glasstärke auf die Sehschärfe und gibt darüber hinaus einen Überblick über vorangegangene Untersuchungen zu diesem Thema. Auf Grundlage dieser Kenntnisse kann anhand des Stärkenverlaufs eines Gleitsichtglases eine theoretische Vorhersage über den Sehschärfeverlauf beim Blick durch verschiedene Bereiche des Glases gemacht werden.

1. Einleitung

Um den Effekt der o.g. Optimierungsmaßnahmen für Gleitsichtgläser besser beurteilen zu können wäre es interessant ein Messverfahren zu haben, dass die blickwinkelabhängige Messung der Sehschärfe und die Darstellung des Sehschärfeverlaufs ermöglicht. Da dies erfordert, die Sehschärfe wiederholt möglichst oft zu messen, ist es besonders wichtig ein Verfahren zu verwenden, das die Darbietungszahl und damit die Geschwindigkeit der einzelnen Sehschärfeermittlungen optimiert, ohne dabei große Genauigkeitseinbußen zu generieren.

Ein bekanntes, bereits existierendes Verfahren zur automatisierten Erfassung der Sehschärfe ist der Freiburger Visustest (aktuelle Bezeichnung: FrACT). Durch einen schnellen, prüferunabhängigen Testablauf ist dieses Verfahren besonders gut für klinische Studien geeignet. (Bach 1996)

Bei der automatisierten Messung spielt die Auflösung des Anzeigemediums eine wichtige Rolle, in Kombination mit der Größe des Anzeigemediums und der Beobachtungsentfernung begrenzt sie den messbaren Sehschärfebereich. (vgl. Bach (2014, S. 4))

Die Idee ein Visusraster aufzunehmen weist Parallelen zur Gesichtsfeldmessung (Perimetrie) auf. Auch hier müssen Wahrnehmungsschwellen über einen größeren Bereich ermittelt werden. Hier existieren bereits seit längerer Zeit automatisierte Verfahren, die insbesondere für die effiziente Erfassung eines Messpunktrasters optimiert sind. (vgl. Schiefer et al. (2006))

1.1. Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung eines Programms, mit dem die Sehschärfe blickwinkelabhängig erfasst werden kann.

Aufbauend auf dem Vorbild des Freiburger Visustests sollen Möglichkeiten zur Optimierung des Messablaufs für die Rastermessung aufgezeigt werden. Diese Erkenntnisse sollen in einem Programm umgesetzt werden. Der Test soll bei der Darstellung der Testzeichen berücksichtigen, dass sich der Abstand bei schrägem Blick auf die Anzeigefläche ändert und die Testzeichengröße dementsprechend anpassen.

Die Benutzeroberfläche soll dem Nutzer ermöglichen:

- Sehzeichen in Form von Vektorgrafiken zu importieren und so die Sehzeichen individuell anzupassen
- alle für die Messung wichtigen Informationen bezüglich des Testaufbaus einzugeben
- die Parameter zur Optimierung des Messablaufs zu beeinflussen um festzustellen, ob diese einen Vorteil bringen und welche Einstellungen besonders effektiv sind
- festzulegen, ob Sehschärfe Messpunkt für Messpunkt ermittelt, oder ob der Darbietungsort zufällig gewählt werden soll
- die Testergebnisse sinnvoll darzustellen und möglichst viele Informationen zum Test (inkl. den zugrundeliegenden Einstellungen) einzusehen
- die Testergebnisse im *.csv-Format zu exportieren, um sie weiter analysieren zu können

Die Messung soll zunächst bei fester Kopfhaltung ohne komplexere technische Hilfsmittel, wie z.B. Head-/Eye-Tracking-Systeme, auskommen. Eine Einbindung solcher Systeme ist allerdings durchaus geplant, weshalb die gewählte Programmiersprache mit diesen Systemen möglichst kompatibel sein sollte.

Ergänzend zur Erstellung des Programms sollen Probemessungen im Vergleich zu FrACT und erste Rastererfassungen durchgeführt werden, um einen Eindruck davon zu gewinnen, ob die blickwinkelabhängige Erfassung der Sehschärfe mit dem entwickelten Programm funktioniert.

2. Grundlagen/Theorie

2.1. Stärkenverlauf eines Gleitsichtglases und sein Einfluss auf die Sehschärfe

Das Gleitsichtglas ist mittlerweile eine weit verbreitete Sehhilfe. Es ermöglicht Alterssichtigen(Presbyopen¹) scharfes Sehen in Ferne und Nähe. Im Unterschied zu anderen Hilfsmitteln besitzt das Gleitsichtglas einen Stärkenverlauf, der dem Träger scharfes Sehen in allen Zwischenentfernungen ermöglicht. Der Stärkenverlauf ist so angelegt, dass die Stärke des Glases bei Blicksenkung zunimmt(vgl. Abbildung 2.1(links)).

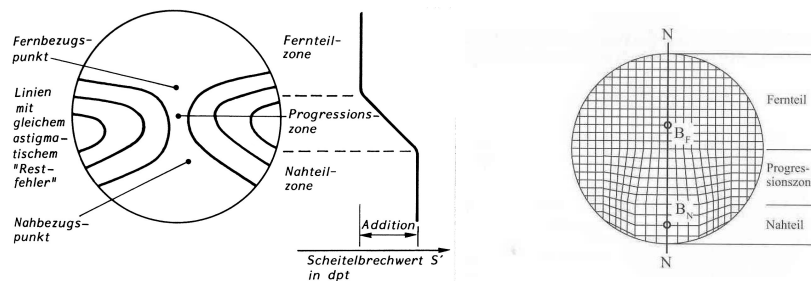


Abbildung 2.1.: links: veranschaulicht den Stärkenverlauf eines Gleitsichtglases (Methling 2013, S. 273)

rechts: zeigt den hypothetischen Brechwertverlauf anhand von Größe und Verzeichnung eines Rechteckrasters(Diepes & Blendowske 2005, S. 254)

Aus technischen Gründen lässt es sich bei der Erstellung von Gleitsichtgläsern nicht vermeiden, dass Bereiche um die Progressionszone entstehen, in denen die

¹ Mit zunehmendem Alter nimmt die für scharfes Sehen in der Nähe notwendige Flexibilität der Augenlinse ab (Diepes 2004, S. 41)

2. Grundlagen/Theorie

Stärke vom benötigten Wert abweichen. In Abbildung 2.1(links) werden diese Restfehler als Isolinien dargestellt. Sie führen dazu, dass ein Objekt beim Blick durch diese Bereiche nicht mehr komplett scharf auf die Netzhaut abgebildet werden kann.

Zum Einfluss dieses Stärkenverlaufs auf die Sehschärfe wurden bereits einige Studien durchgeführt. Auf Grundlage dieser Studien kann sowohl der Einfluss sphärischer Refraktionsfehler (Nahstärke), als auch der von astigmatischer Abbildung (Randbereich), auf die Sehschärfe abgeschätzt werden.(vgl. Wederz (2006))

Wederz (2006) kann in ihren Messungen bestätigen, dass Astigmatismen, wie sie in einem Gleitsichtglas auftreten, eine ähnliche Auswirkung auf die Sehschärfe haben, wie eine sphärische Stärkenänderung ähnlichen Betrags und einen funktionellen Zusammenhang zwischen beiden Refraktionsfehlern und der Sehschärfe beschreiben.

In Abbildung 2.1(rechts) kann außerdem erkannt werden, dass der vertikale Stärkenanstieg nur zentral voll ausgeprägt ist und zu den Seiten hin abnimmt, er verhält sich also gegenläufig zum Astigmatismus und geht fließend in diesen über. Hieraus kann gefolgert werden, dass der in der Abbildung deutlich erkennbare horizontale Stärkenverlauf durch den Restfehler bei einer Visusmessung nur in der, der Prüferentfernung entsprechenden, Durchblickshöhe so deutlich hervortreten dürfte.

2.2. Die Sehschärfe

2.2.1. Definitionen

Allgemein: „Der Begriff ‚Sehschärfe‘ bezeichnet ganz allgemein die Fähigkeit des Sehorgans ‚scharf‘ zu sehen, das heißt, in einem gegebenen Objekt möglichst viele Einzelheiten zu erkennen.“(Diepes 2004, S. 56)

Messung: Möchte man Zahlenwerte für die Sehschärfe festlegen, so wird diese am Auflösungsvermögen des Auges gemessen, also dem kleinsten Abstand den zwei Punkte voneinander haben dürfen, um getrennt erkannt zu werden. Um den Abstand dieser Punkte unabhängig von der Beobachtungsentfernung angeben zu können, wird dieser in der Regel über den Winkel, den die beiden Punkte aus Sicht des Beobachters zueinander einnehmen definiert (Anguläre Sehschärfe). (vgl. Diepes (2004, S. 57))

Abhängig davon, welche Objekte zur Bestimmung der Sehschärfe verwendet werden, können verschiedene Arten von Sehschärfen unterschieden werden. In der optometrischen Praxis wird der Begriff allerdings meist als Synonym für Erkennungssehschärfe¹ verwendet. Sie kann sich von der Auflösungssehschärfe unterscheiden, wenn die Form eines Objekts das Erkennen erlaubt, bevor das charakteristische Detail eine ausreichende Größe erreicht. (Berke 2009, S. 41f) Die Erkennungssehschärfe wird bei der Bestimmung der Fehlsichtigkeit als Entscheidungskriterium für die beste optische Korrektur herangezogen.

Visus: Der Visus ist ein entfernungsunabhängiges Maß für die Sehschärfe. Er wird über den Winkel, unter dem ein Objekt aus der Perspektive des Beobachters erscheint, definiert.

$$Visus = \frac{1'}{\alpha[']}$$

Da die normale Sehschärfe in der Größenordnung von Winkelminuten['] liegt, wird der Visus auf eine Winkelminute bezogen. Um zu erreichen, dass eine hohe Sehschärfe (kleiner Winkel) einem hohen Wert entspricht, wird der Visus über den Kehrwert des Winkels definiert.

Sehzeichengrößen werden üblicherweise geometrisch abgestuft, was bedeutet, dass eine Stufe nicht einer konstanten Größenänderung entspricht, sondern das Verhältnis zweier benachbarter Stufen gleich bleibt. Diese Abstufung verläuft analog zur Wahrnehmung. Bei höherer Sehschärfe können auch kleinere Unterschiede

¹ Ein Maß für die minimale Größe, die nötig ist um ein Objekt zu erkennen/von anderen zu unterscheiden zu können

2. Grundlagen/Theorie

wahrgenommen werden. Der übliche Faktor für die Visusabstufung ist $\sqrt[10]{10}$. (Berke 2009, S. 53)

2.2.2. Sehzeichen

Im Grunde kann jedes Symbol zur Ermittlung der Erkennungssehschärfe verwendet werden.

Da das Kriterium für das Erkennen die Unterscheidung von anderen Sehzeichen einbezieht, muss das Sehzeichen so groß dargeboten werden, dass das für das Sehzeichen charakteristische Detail (oder seine Form) eine eindeutige Zuordnung möglich macht. (Berke 2009, S. 54) Der Visus muss also an dieser Größe und nicht an der Gesamthöhe des Sehzeichens gemessen werden.

Bei der Auswahl von Sehzeichen sollte darüber hinaus noch beachtet werden, dass der Proband in der Lage sein muss diese zu benennen, so wäre beispielsweise die Darbietung von Buchstaben bei einem Analphabeten nicht besonders zielführend.

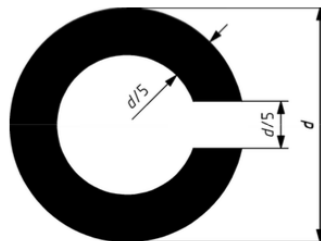


Abbildung 2.2.: Der Landoltring nach DIN EN ISO 8596 (2009)

Das Normsehzeichen für die Ermittlung der Sehschärfe ist der Landoltring. Er wird in DIN EN ISO 8596 (2009) beschrieben und die Konstruktionsvorschrift ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Das für die Erkennung notwendige charakteristische Detail entspricht der Lücke und hat eine Größe von einem Fünftel der Gesamthöhe. Bei einem Sehtest muss der Proband die Position der Lücke richtig erkennen. Die Lücke kann in acht unterschiedlichen Richtungen dargeboten werden, wodurch

die Chance, dass der Proband die Richtung zufällig richtig errät, mit $\frac{1}{8}$, relativ gering ist. Gleichzeitig kann die Größe des charakteristischen Details durch die einheitliche Form gut mit dem Auflösungsvermögen des Auges in Verbindung gebracht werden.

2.3. Der Freiburger Visustest

Der **Freiburg (visual) Acuity & Contrast Test** ist ein auf der Homepage des Entwicklers Prof. Dr. M. Bach (*FrACT-Homepage* 2015) frei erhältliches Programm, das zur automatisierten Messung der Sehschärfe entwickelt wurde.

Das Programm wird von Bach (1996) beschrieben. Es ermöglicht neben dem Sehschärfetest auch eine Erfassung der Kontrastsehschärfe und wird seither kontinuierlich weiterentwickelt. So kann beispielsweise die Sehzeichenposition auf dem Bildschirm in der aktuellen Version (3.9) vertikal und horizontal beeinflusst und Ergebnisse können bequem per Tastendruck exportiert werden. (Bach 2014, S. 5, 8)

Ein wichtiges Kernelement von FrACT ist der implementierte best PEST¹-Algorithmus, ein Verfahren, das nach jeder Darbietung die optimale Sehzeichengröße zur Schwellenermittlung berechnet. [siehe Abschnitt 2.6.3 „Maximum-Likelihood“ (S. 16)]

Das zur Darstellung der Sehzeichen verwendete Antialiasing² ermöglicht eine feinere Abstufung der Sehzeichengrößen. [siehe Abschnitt 2.4.2 „Antialiasing“ (S. 11)]

Da die Möglichkeit besteht, die Antworten vom Probanden selbst über eine Tastatur eingeben zu lassen und die Berechnung der Sehzeichengröße automatisch geschieht, kann die Sehschärfe mit FrACT prüferunabhängig ermittelt werden. Dies führt zu einer verbesserten Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Darüber hinaus können viele Testparameter individuell angepasst werden. Durch diese Eigenschaften ist das Verfahren besonders gut für Studienzwecke geeignet.

¹ **P**arameter **E**stimation by **S**equential **T**esting ² Stufenglättung von Rastergrafiken

2.4. Darstellbarkeit von Sehzeichen

2.4.1. Das Anzeigemedium

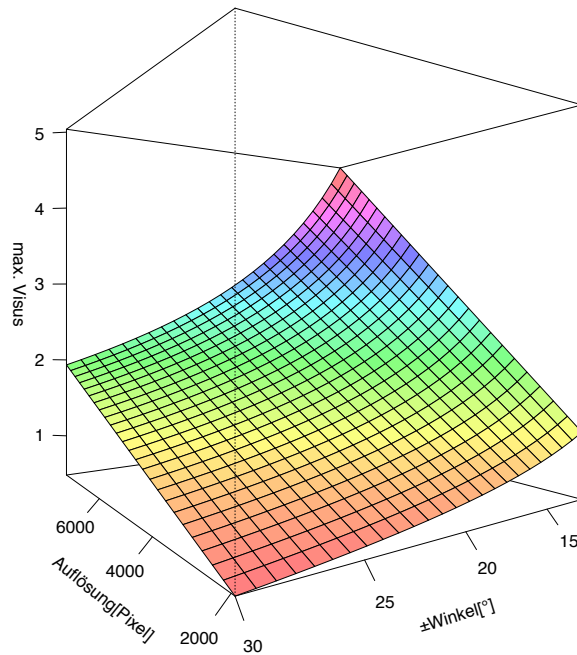


Abbildung 2.3.: zeigt den Zusammenhang zwischen der Auflösung des Anzeigemediums, dem Winkel den dieses ausfüllt und dem Visus, unter dem ein einzelnes Pixel erscheint.

Der wichtigste limitierende Faktor bei der Darbietung von Sehzeichen über einen Bildschirm/Beamer ist die Auflösung der Darstellungsmedien. Grund hierfür ist, dass das kleinste darstellbare Detail auf diesen Medien immer durch den Winkel begrenzt ist, unter dem ein einzelnes Pixel erscheint.

Dies fällt besonders in's Gewicht, wenn, wie in diesem Fall, ein Sehzeichen nicht nur in der Bildschirmmitte dargeboten werden, sondern blickwinkelabhängig auf der Testfläche erscheinen soll. Bei konstanter Auflösung muss hierfür entweder der Beobachtungsabstand verringert, oder die Projektionsfläche (beim Beamer)

optisch vergrößert werden. In beiden Fällen erscheint das einzelne Pixel unter einem größeren Winkel, wodurch das kleinste darstellbare Sehzeichen größer wird.

Zunächst soll ein Eindruck davon gewonnen werden welche Sehzeichengrößen, mit heute erhältlichen Anzeigemedien, unter der Prämisse, dass diese einen bestimmten Blickwinkel ausfüllen müssen, erreicht werden können. Hierzu wird die Größe eines Pixels unter der Bedingung, dass ein ebenes Anzeigemedium mit heute erhältlichen Auflösungen (HDMI bis 8K) einen Winkel von $\pm 15^\circ$ bis $\pm 30^\circ$ ausfüllt, berechnet. Die Pixelhöhe wird für den Blick auf das Zentrum der Fläche berechnet, da dieser Punkt den geringsten Abstand zum Beobachter hat und dadurch am größten erscheint. Zur Berechnung wurde die frei erhältliche Statistik-Programmiersprache „R“ (*R-Project-Homepage* 2015) verwendet, der Quellcode kann im Anhang (Listing F.1) eingesehen werden. Abbildung 2.3 zeigt die grafische Darstellung des Ergebnisses der Berechnung. Es kann erkannt werden, dass schon mit der heute üblichen HDMI-Auflösung bei einer Anforderung von $\pm 15^\circ$ ein Visus von ≈ 1 erreicht werden kann.

Ein 8K-Monitor könnte bei einer Anforderung von $\pm 30^\circ$ sogar Sehzeichengrößen von *Visus* ≈ 2 darstellen.

2.4.2. Antialiasing

Antialiasing (Kantenglättung) wird im Allgemeinen vor allem bei Computergrafiken verwendet, um Konturverläufe bei der Projektion auf ein Pixelraster feiner darstellen zu können. Das zugrunde liegende Funktionsprinzip wird in Abbildung 2.4 an einem Landoltring veranschaulicht.

Hierbei macht man sich zunutze, dass Bildschirme in der Regel aus einem Abstand betrachtet werden, bei dem das einzelne Pixel nicht mehr als solches erkannt wird. Details innerhalb des Pixels liegen folglich unter dem (räumlichen) Auflösungsvermögen des Betrachterauges. Daraus folgt, dass der Beobachter nicht zwischen einem Pixel, das zur Hälfte schwarz und zur Hälfte weiß, und einem Pixel, dass mit einer Graustufe halber Leuchtdichte dargestellt wird, unterscheiden kann. In der Wahrnehmung werden Leuchtdichteverläufe unterhalb der räumlichen Auflösungsgrenze

2. Grundlagen/Theorie

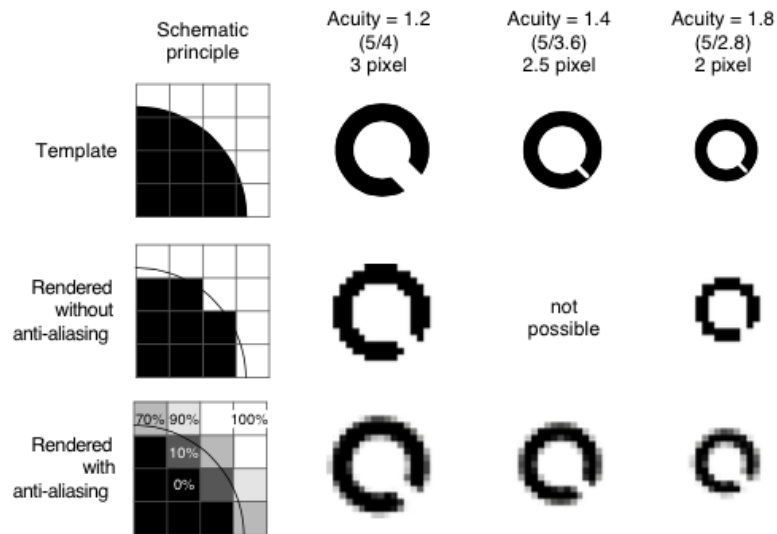


Abbildung 2.4.: Antialiasing(Bach 1996, S. 8)

Das Funktionsprinzips von Antialiasing:

In der ersten Zeile wird ein Muster eines Landoltrings in drei verschiedenen Größen gezeigt.

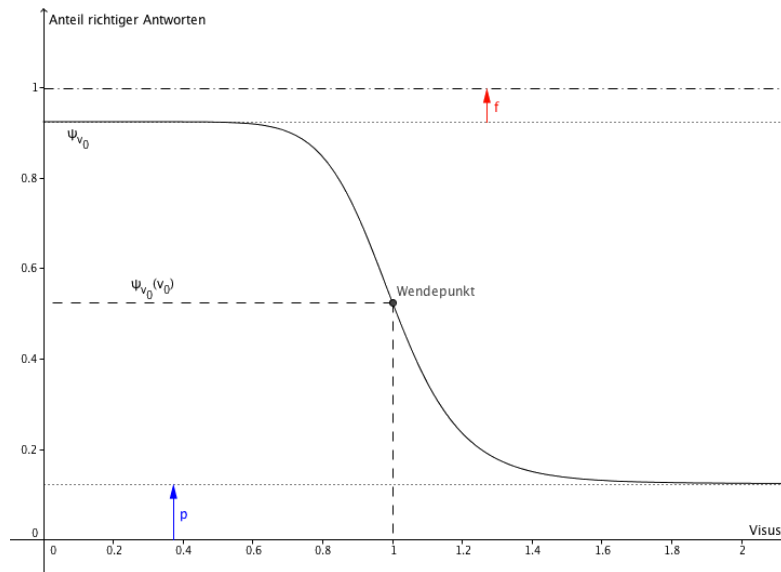
Die folgenden Zeilen zeigen die Übertragung dieses Musters auf ein Pixelraster zunächst ohne Antialiasing (mittlere Zeile) und unter Anwendung von Antialiasing (untere Zeile).

(Tiefpassfilterung), auf Grundlage von Erfahrung, zu sinnvollen Konturverläufen ergänzt. Durch passende Graustufung im Randbereich eines Objekts kann also der Eindruck eines feineren Konturverlaufs erzeugt werden.

Die in Abbildung 2.4 dargestellten Objekte sind zur Veranschaulichung des Funktionsprinzips stark vergrößert dargestellt. Um den Effekt deutlich erkennen zu können muss der Beobachtungsabstand erhöht werden, bis die einzelnen Pixel verschwimmen. (vgl. Bach (1996, S. 8))

Im FrACT kommt Antialiasing zur feineren Abstufung von Sehzeichengrößen zum Einsatz. Bach (1996, S. 8f) beschreibt, dass die Anwendung dieses Verfahrens eine Abstufung der Sehzeichen entsprechend einem Viertel der Pixelhöhe möglich macht.

2.5. Die psychometrische Funktion

Abbildung_{Geo} 2.5.: Die psychometrischen Funktion

Die psychometrische Funktion beschreibt den Anteil richtig erkannter Sehzeichen abhängig von Sehzeichengröße und Sehschärfe.

Abbildung 2.5 zeigt eine schematische Darstellung der psychometrischen Funktion für eine Sehschärfe von 1.

Sie kann durch die Angabe von vier Parametern vollständig beschrieben werden. (Treutwein & Strasburger 1999, S. 87)

Die zugehörige Funktion lautet:

$$\psi_{v_0}(v) = p + \frac{1 - (p + f)}{1 + \left(\frac{v}{v_0}\right)^s}$$

v_0 : Sehschärfe (Schwelle); v : Sehzeichengröße; p : Ratequote; f : Fehlerquote; s : Steilheit

Die Steilheit der Funktion kann als 10 angenommen werden. (vgl. Bach (1996, S. 5))

Theoretisch sollte der Anteil richtig erkannter Sehzeichen zwischen null und eins verlaufen. Da bei Sehtests aber ein Sehzeichen aus einer begrenzten Menge von Sehzeichen erkannt werden muss besteht immer die Chance, dass ein Sehzeichen erraten wird, auch wenn es eigentlich zu klein ist, um es erkennen zu können.

2. Grundlagen/Theorie

Daraus ergibt sich die Ratequote, die die Funktion nach unten begrenzt. Bei einem Landoltring mit acht möglichen Darbietungsrichtungen liegt die Ratequote bei $\frac{1}{8}$. Bis hierhin ist die psychometrische Funktion, wie sie der Schwellenermittlung im FrACT zugrunde liegt, vollständig beschrieben.

Die Fehlerquote wird oft vernachlässigt, da sie bei kurzen, leicht bedienbaren Tests ohnehin sehr gering ist. Sie beschreibt die Möglichkeit, dass ein Sehzeichen trotz ausreichender Größe falsch angegeben wird. Dies kann z.B. passieren, wenn die Aufmerksamkeit eines Probanden bei längeren Tests schwindet oder wenn der Proband nicht gut mit der Bedienung vertraut ist und daher Fehler bei der Eingabe macht.

Betrachtet man die Funktion in Abbildung 2.5, so kann erkannt werden, dass es keinen klaren Schnitt zwischen erkennbaren und nicht mehr erkennbaren Sehzeichengrößen gibt. Die psychometrische Funktion geht fließend vom Maximum in's Minimum über. Daher wird die psychometrische Schwelle über den Wendepunkt der Funktion definiert. An dieser Stelle ist die Funktion am steilsten, wodurch der Funktionswert am besten von benachbarten Punkten unterschieden werden kann.

2.6. Möglichkeiten der Ermittlung der Schwelle

2.6.1. Standardverfahren

Das Standardverfahren zur Ermittlung der Sehschärfe ist in DIN 58220-5 (2013-09) beschrieben. Es handelt sich um eine einseitige Ermittlung der Schwelle, bei der je Sehzeichengröße 5/6/10 Testzeichen dargeboten werden. Bei diesem Verfahren wird mit großen Testzeichen begonnen und die Testzeichengröße schrittweise um den Faktor $\sqrt[10]{10}$ verkleinert, bis weniger als 50% der Sehzeichen erkannt werden. Die vorausgegangene Sehzeichengröße wird als Schwelle angegeben.

Das Abbruchkriterium (6 aus 10/4 aus 6 /3 aus 5) führt dazu, dass das Verfahren nicht genau die steilste Stelle der psychometrischen Funktion ermittelt, wodurch

das Ergebnis leicht von der psychometrischen Schwellendefinition abweicht. (Bach 1996, S. 6)

2.6.2. Eingabelung

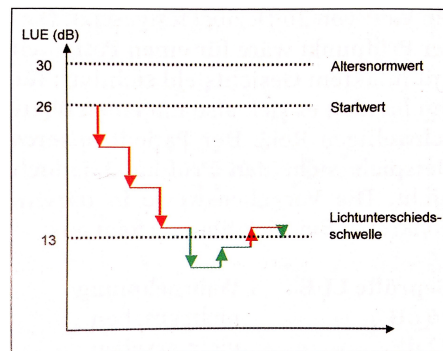


Abbildung 2.6.: Darstellung der Eingabelung am Beispiel des 4-2-1-Algorithmus (Berke 2009, S 266)

Eine zweite Möglichkeit der Schwellenermittlung ist die Eingabelung der Schwelle. Hierbei handelt es sich um eine aktuell weit verbreitete Strategie bei der automatisierten Ermittlung von Wahrnehmungsschwellen, die u.A. im Bereich der konventionellen Perimetrie (vgl. Schiefer et al. (2006)) und im Bereich der Hörakustik beim OLSa¹ Anwendung findet.²

Hierbei wird der Messaufwand reduziert, indem der Messreiz zunächst in großen Schritten geändert wird bis ein Antwortumschlag³ auftritt. Nach dem Umschlag wird die Schrittlänge halbiert und die Reizgröße in entgegengesetzter Richtung geändert, bis wieder ein Antwortumschlag auftritt. Diese Vorgehensweise kann wiederholt werden, bis die Schwelle mit ausreichender Genauigkeit ermittelt wurde. Das Prinzip der Eingabelung wird in Abbildung 2.6 verdeutlicht. Im Unterschied zu anderen Verfahren wird die Schwelle nicht mit einer fixen Darbietungszahl gemessen, sondern ein dynamisches Abbruchkriterium abhängig von der erreichten Genauigkeit definiert.

¹ Oldenburger Satztest ² In neueren Versionen werden die Eingabelungsverfahren in allen Bereichen zunehmend auf Maximum-Likelihood-Algorithmen umgestellt, wodurch der Darbietungsverlauf weiter optimiert werden kann. ³ der Reiz wird zum ersten Mal erkannt/nicht mehr erkannt

2. Grundlagen/Theorie

Dieses Verfahren hat vor allem einen Vorteil, wenn ohne Vorkenntnisse eine Schwelle über einen großen Bereich ermittelt werden soll. Da die Schrittweite erst in Schwellennähe (Antwortumschlag) verkleinert wird, kann die Zahl der Darbietungen so deutlich reduziert werden.

Wie schon in der Beschreibung des Standardverfahrens erwähnt, weicht das Ergebnis einer psychometrischen Schwellenermittlung vom Standardverfahren ab. Die Abweichung kann durch Multiplikation mit einem Faktor von 0.892 gut behoben werden. (Bach 1996, S. 6)

2.6.3. Maximum-Likelihood

Bei der ML¹-Methode handelt es sich um ein Schätzverfahren der BAYES'schen Statistik, dessen Ziel es ist die Parameter einer Verteilung zu bestimmen. Ähnlich wie bei der Eingabelung wird die Schrittweite auf Grundlage vorausgegangener Stichprobenergebnisse geändert, allerdings so, dass der Reiz immer in der Größe der geschätzten Schwelle dargeboten wird. Diese entspricht der Sehschärfe, mit der die bereits ermittelten Probandenaussagen am wahrscheinlichsten sind.

Die ML wird auch vom FrACT als zentraler Bestandteil des best PEST Algorithmus zur Schwellenermittlung verwendet.

Funktionsprinzip

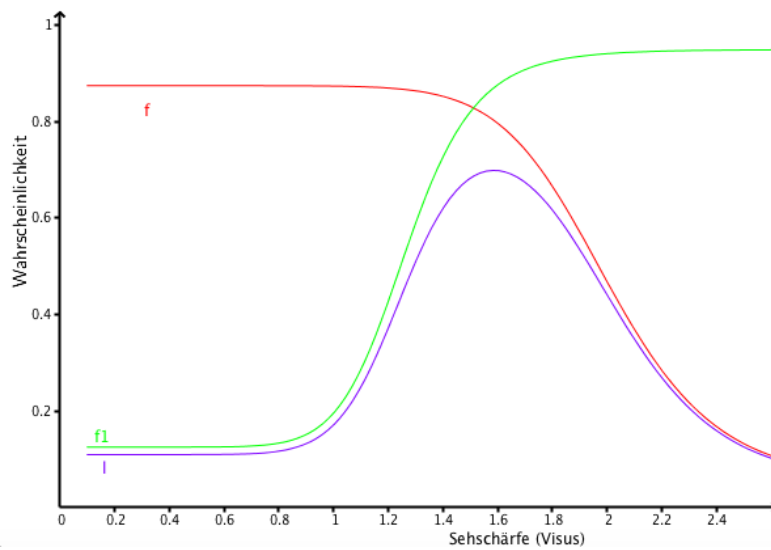
In der gängigsten Darstellung der psychometrischen Funktion wird die Sehschärfe als fix angenommen und die Sehzeichengröße als unabhängige Variable aufgetragen. (Abbildung 2.5)

Wird stattdessen die Sehschärfe, unter Annahme einer fixen Sehzeichengröße, als unabhängige Variable aufgetragen, so erhält man eine Funktion, die die Chance auf eine richtige Antwort abhängig von der Sehschärfe beschreibt. (Abbildung 2.7, [f1](#)) Analog dazu ergibt sich für die Chance auf eine falsche Antwort (1-richtig) ein gegenläufiger Verlauf (vgl. [f](#)).

Die Funktionswerte dieser Funktionen werden auch als Likelihood bezeichnet.

¹ Maximum-Likelihood

2.6. Möglichkeiten der Ermittlung der Schwelle



Abbildung_{Geo} 2.7.: Likelihood

f1: Verlauf für eine richtige Antwort bei einer Sehzeichengröße von Visus=1.25; **f**: Verlauf für eine falsche Antwort bei einer Sehzeichengröße von Visus=2; **l**: Die Likelihood für die Kombination beider Funktionen (Produkt der Funktionswerte)

Die Likelihood einer Reihe von Ereignissen ergibt sich aus dem Produkt der einzelnen Funktionen (Abbildung 2.7, **l**). Ermittelt man nach jeder Darbietung das Maximum dieser Funktion, so erhält man einen immer genaueren Schätzwert für die Lage der Wahrnehmungsschwelle des Probanden. Um die Schwelle möglichst schnell zu ermitteln wird das nächste Sehzeichen in der Größe der geschätzten Schwelle dargeboten, da hier am meisten Information generiert werden kann. (Bach 1996, S. 6)

Die Funktion, mit der man die Likelihood für eine bestimmte Sehschärfe bestimmen kann, lautet(vgl. Bach (1996), Treutwein & Strasburger (1999, S. 6, S.89)):

$$L_{v_0} = \prod_{i=1}^n \begin{cases} \psi_{v_0}(v_i) & \text{wenn die Antwort richtig ist} \\ 1 - \psi_{v_0}(v_i) & \text{wenn die Antwort falsch ist} \end{cases}$$

Bei der wiederholten Darbietung von Sehzeichen wird der Funktionswert immer wieder mit einem Faktor < 1 multipliziert. Er wird also mit jeder Darbietung kleiner. Dies kann vor allem bei der Umsetzung in Programmialgorithmen zu einem Problem

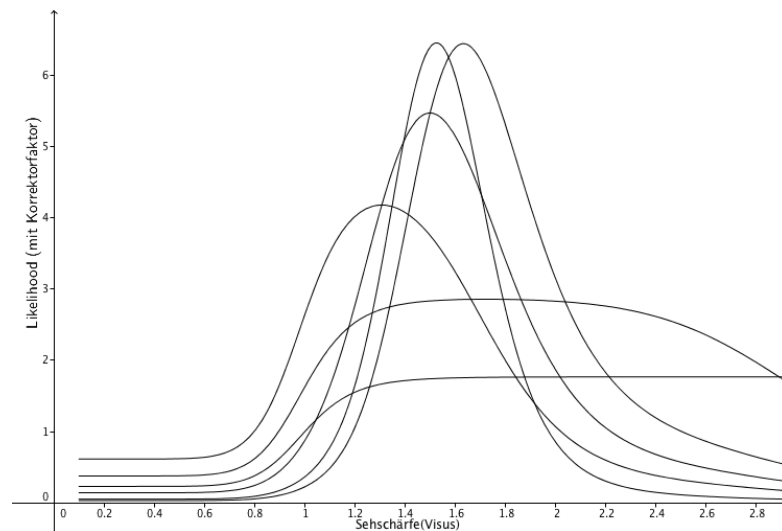
2. Grundlagen/Theorie

werden, da Zahlwerte nur mit einer begrenzten Genauigkeit¹ verarbeitet werden können.

Um diesem Problem entgegenzuwirken beschreibt Treutwein & Strasburger (1999, S. 90) die Einführung eines Korrekturfaktors, der dazu führt, dass der Funktionswert am Wendepunkt = 1 (näherungsweise Normalisierung der Funktion) ist. Hierfür muss die Funktion bei jeder Darbietung mit dem Kehrwert der Schwellenwahrscheinlichkeit multipliziert werden:

$$K = \begin{cases} (\psi_{v_0}(v_0))^{-1} & \text{wenn die Antwort richtig ist} \\ (1 - \psi_{v_0}(v_0))^{-1} & \text{wenn die Antwort falsch ist} \end{cases}$$

Abbildung 2.8 zeigt den Likelihoodverlauf unter Einbeziehung des beschriebenen Korrekturfaktors. Die Darstellung beginnt mit einer Sehzeichengröße von 1. Als Antwort wurde immer die wahrscheinlichere Antwort eines Probanden mit Visus=1.6 gewählt. Es kann erkannt werden, dass das Maximum der Funktion zunächst ansteigt, sich mit der Annäherung an die Schwelle allerdings auf einer Höhe einpendelt.



Abbildung_{Geo} 2.8.: Likelihoodverlauf mit Korrekturfaktor

¹ Werden die Genauigkeitsgrenzen von Zahlwerten über bzw. unterschritten, so spricht man von einem over-/underflow.

Der best-PEST-Algorithmus

Der best **P**arameter **E**stimation by **S**equential **T**esting Algorithmus bestimmt während des Testablaufs beim FrACT die ML. Hierbei werden die Funktionswerte der psychometrischen Funktion logarithmiert, um einen Underflow zu vermeiden (Lieberman & Pentland 1982, S. 23). Diese Vorgehensweise stellt eine Alternative zum weiter oben beschriebenen Korrekturfaktor dar.

Um das Maximum der Likelihood-Funktion zu bestimmen wird ein Array von angenommenen Sehschärfen im Messbereich angelegt. Für jede dieser Sehschärfen wird nach jeder Darbietung der Likelihood-Wert aktualisiert. Die Ermittlung des Maximums der Likelihood geschieht dann, indem das Array von einer Schleife durchlaufen und die Sehschärfe mit dem höchsten Wert ausgegeben wird.

2.7. Beschreibung von Blickrichtungen

Bei der Beschreibung von Blickrichtungen muss zunächst festgelegt werden, in welchem Bezugssystem diese beschrieben werden sollen. Es kann zwischen einem augenfixierten, kopffixierten und im Raum fixierten Koordinatensystemen unterschieden werden (Quaia & Optican 2003).

Das Gleitsichtglas bewegt sich mit dem Kopf mit, daher ist es sinnvoll die Blickrichtung relativ zur Kopfposition zu beschreiben. Auf diese Weise kann sie direkt mit einem Durchblickspunkt in Verbindung gebracht werden.

Da zunächst bei fixer Kopfhaltung gemessen werden soll, genügt es die Augenrotation anhand eines augenfixierten Systems im Raum zu beschreiben.

Grundsätzlich gibt es viele Koordinatensysteme, die zur Beschreibung von Rotationen genutzt werden können (Wong 2004). Im Folgenden werden einige Möglichkeiten beschrieben, die eine anschauliche Unterscheidung vertikaler und horizontaler Blickrichtungsänderungen ermöglichen.

2.7.1. Rechteckraster mit Winkelbezug

Die einfachste Möglichkeit ein Raster zu erzeugen, auf dem die Sehzeichen dargestellt werden können, ist ein Rechteckraster. Ein ebenes Rechteckraster ermöglicht zwar die Unterscheidung zwischen vertikalen und horizontalen Blickbewegungen, der Winkel zwischen den einzelnen Punkten nimmt allerdings nach außen hin ab. Passt man die Sehzeichengröße dem Abstand an, so kann dies bei großen Blickwinkeln dazu führen, dass große Sehzeichen schneller überlappen.

Um ein solches Raster entfernungsunabhängig darstellen zu können, kann der Punktabstand über den Winkel definiert werden, unter dem ein Rasterelement in Hauptblickrichtung erscheint.

2.7.2. Gängiges Blickwinkelmodell: Fick-Koordinaten

Die Orientierung des Auges kann durch aufeinander folgende Drehung in drei Freiheitsgraden vollständig beschrieben werden. Abbildung 2.9 zeigt ein Auge mit drei Rotationsachsen, die die drei Freiheitsgrade repräsentieren. Die Achsen bilden ein augenfixiertes Koordinatensystem, drehen sich also bei einer Drehung des Auges mit.

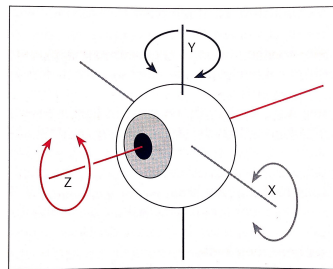


Abbildung 2.9.: Freiheitsgrade der Augenrotation (Dietze & Artes 2008, S. 172)

Die Abfolge der Drehungen ist nicht kommutativ. Es muss also festgehalten werden, in welcher Reihenfolge die Drehungen passieren.

Da ein Freiheitsgrad (z-Achse) keinen direkten Einfluss auf die Blickrichtung

2.7. Beschreibung von Blickrichtungen

hat, kann jede Blickrichtung durch Rotation um zwei dieser Achsen erreicht werden. (Quaia & Optican 2003)

Grundsätzlich können in einem solchen System drei Typen von Blickrichtungen unterschieden werden:

Primärposition: Die Bezugsrichtung, zu der jede Drehung beschrieben wird. (Abbildung 2.10 Mitte)

Sekundärposition: Blickrichtungen, die über eine Drehung um eine der augenfixierten Achsen erreicht werden können. (Abbildung 2.10 Horizontale und Vertikale)

Tertiärposition: Blickrichtungen, die eine Drehung um mehr als eine der augenfixierten Achsen nötig ist. (Abbildung 2.10 Diagonale)

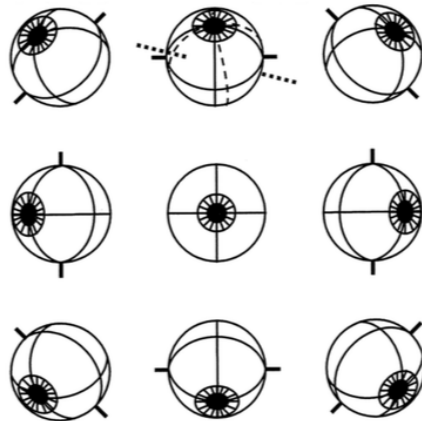


Abbildung 2.10.: Beschreibung von Blickrichtungen (Wong 2004, S. 565)

Lässt man die z-Komponente zur Beschreibung der Blickrichtung weg, so erhält man ein Koordinatensystem, in dem Blickrichtungen durch eine vertikale und eine horizontale Komponente beschrieben werden können. Dieser Ansatz entspricht einer Beschreibung der Blickrichtung, wie sie anhand eines Fick- oder Helmholtz-gimbals (Abbildung 2.11) stattfinden würde. Die beiden Apparate unterscheiden sich darin, ob zuerst um die horizontale oder um die vertikale Achse gedreht wird.

2. Grundlagen/Theorie

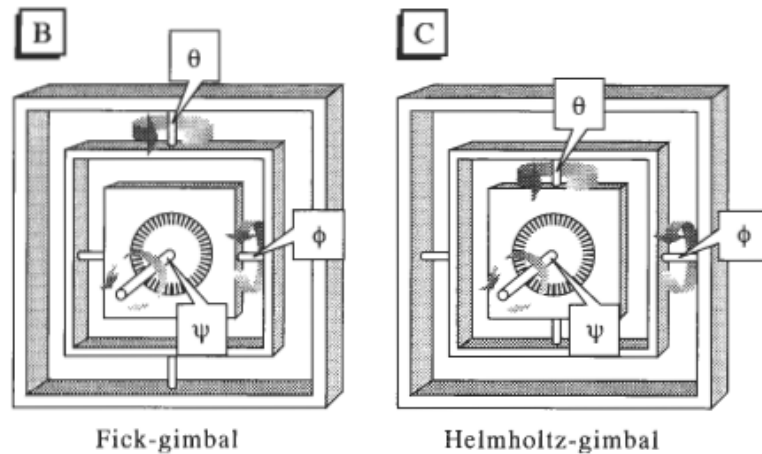


Abbildung 2.11.: Darstellung eines Fick- und Helmholtzgimbals (Haslwanter 1995, S. 1730)

Zeichnet man die Isolinien eines durch ein Fick-Gimbal beschriebenen Koordinatensystems auf eine Kugeloberfläche, so wird deutlich, dass die Drehwinkel ein Koordinatensystem analog zu geographischen Längen- und Breitengraden aufspannen. (Abbildung 2.12)

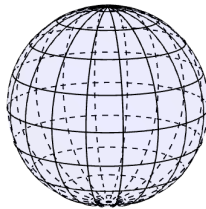


Abbildung 2.12.: Isolinien des Fick-Gimbals

Projiziert man das Koordinatenraster in die Ebene, so entsteht ein einseitig kissenförmiges Raster. (Abbildung 3.2b)

2.7.3. Raster mit Ebenenbezug

Möchte man die Blickrichtung über zwei Winkel in einem festen Bezugssystem beschreiben, so kann dies geschehen, indem die Winkel zu einer vertikalen und einer

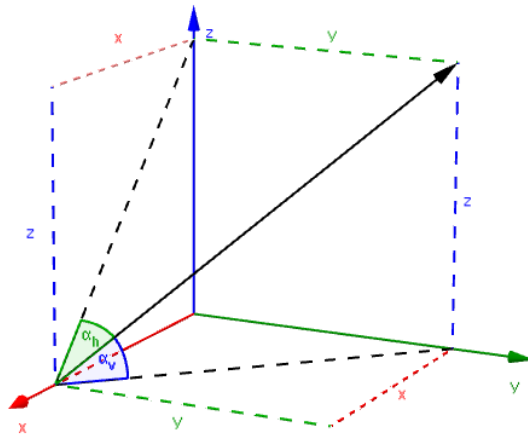


Abbildung 2.13.: Blickrichtung beschrieben durch Winkel zu zwei festen Ebenen

horizontalen Ebene als Bezugswert aufgetragen werden. Sinnvollerweise werden die Ebenen so gewählt, dass die primäre Blickrichtung entlang ihrer Schnittgerade verläuft. Auf diese Weise können die Winkel als vertikale und horizontale Komponenten gesehen werden.

Abbildung 2.13 veranschaulicht die Beschreibung einer Blickrichtung über den vertikalen Winkel α_v und den horizontalen Winkel α_h .

Erzeugt man mit diesem Modell ein Blickwinkelraster, so erhält man ein kissenförmiges Raster. (Abbildung 3.2c)

2.7.4. Vergleich

Die beschriebenen Raster unterscheiden sich in der Nähe des Zentrums kaum (vgl. Abbildung 3.2). Je weiter die Blickrichtung von der Primärposition abweicht, desto größer werden die Unterschiede. Hierbei unterscheiden sich das fick'sche und das Ebenenmodell nur in den Tertiärpositionen. Die Rasterpunkte des Ebenenmodells sind symmetrisch zu den Diagonalen angeordnet und ihr Abstand nimmt entlang der Diagonalen am stärksten zu. Dies erscheint durchaus sinnvoll, da der Beobachtungsabstand und somit die abstandsabhängige Größe des Sehzeichens sich auch entlang der diagonalen Rasterpunkte stärker ändert.

2.8. Optimierung der Testdauer

Eine möglichst kurze Messdauer wird mit zunehmender Zahl an Einzelmessungen immer wichtiger, da eine erhöhte Gesamtdauer, insbesondere bei länger dauernden Tests, eine größere Ermüdung beim Probanden hervorruft. Bei der Messung von Wahrnehmungsschwellen bedeutet dies, dass die Qualität der erzielten Ergebnisse bei langer Testdauer sinkt, da hier in der Regel ein hohes Maß an Aufmerksamkeit benötigt wird um schwellennahe Reize zuverlässig zu erkennen.

Die konventionelle Perimetrie steht, auf Grund der Tatsache, dass hier auch Reizschwellen ortsabhängig über ein Raster ermittelt werden, ähnlichen Problemen gegenüber und kann somit Ideen zur Optimierung des Testablaufs liefern.

Hier werden weitere Vorkenntnisse über die Schwelle einbezogen, um den Messbereich einzugrenzen und Raster verwendet, deren Punktverlauf für die entsprechende Fragestellung optimiert ist. (Schiefer et al. 2006)

Möchte man die Testzeit verkürzen, so lassen sich grundsätzlich Verfahren unterscheiden, die mit Einbußen in der Genauigkeit verbunden sind und solche die ohne Genauigkeitseinbußen auskommen. Ein Testverfahren kann durchaus trotz Genauigkeitseinbußen bessere Ergebnisse liefern als vergleichbare Methoden, die die Schwelle „exakter“ bestimmen (vgl. Diehm (2004)). „Die besseren Resultate, die mit optimierten Prüfstrategien ermittelt werden, dürften zu einem nicht unerheblichen Teil durch die geringere Ermüdung des Patienten als Folge kürzerer Untersuchungsdauern zu erklären sein.“ (Berke 2009, S. 267)

2.8.1. Dynamisches Abbruchkriterium

Grundsätzlich stellt die Verwendung des best-PEST-Verfahrens beim FrACT schon eine verlustfreie Optimierung der mit einer festen Darbietungszahl ermittelten Daten dar. Bach (1996) zeigt, dass der FrACT nach 16 Darbietungen gut reproduzierbare Ergebnisse liefert, weshalb standardmäßig 18 Darbietungen je Messung eingestellt sind. Da die Schwellenermittlung allerdings je nach Rateglück und Eingabefehlern des Probanden unterschiedlich schnell zu diesem Wert kommt, könnte das Verfahren

um einen Algorithmus ergänzt werden, der den Test abbricht, wenn die Schwankung des ML-Schätzwerts innerhalb eines tolerablen Bereichs liegt.

2.8.2. Fehler am Anfang der Messung

Eine Schwäche des PEST-Algorithmus ist, dass er empfindlich auf Falschaussagen zu Beginn, speziell bei der ersten Darbietung reagiert. (vgl. Wesemann 2002, S. 666)

Um Messungenauigkeiten durch Eingabefehler zu Beginn der Messung zu vermeiden, wird beim FrACT empfohlen die Messung abubrechen und neu zu starten. (vgl. Bach 2014, Wesemann 2002)

Da diese Herangehensweise nur schwer auf die Messung vieler Punkte in einem Raster übertragbar ist, wäre es zweckmäßig zu versuchen Falschaussagen zu Beginn der Messung, anhand des Messverlaufs, zu identifizieren und aus dem Messverlauf zu entfernen.

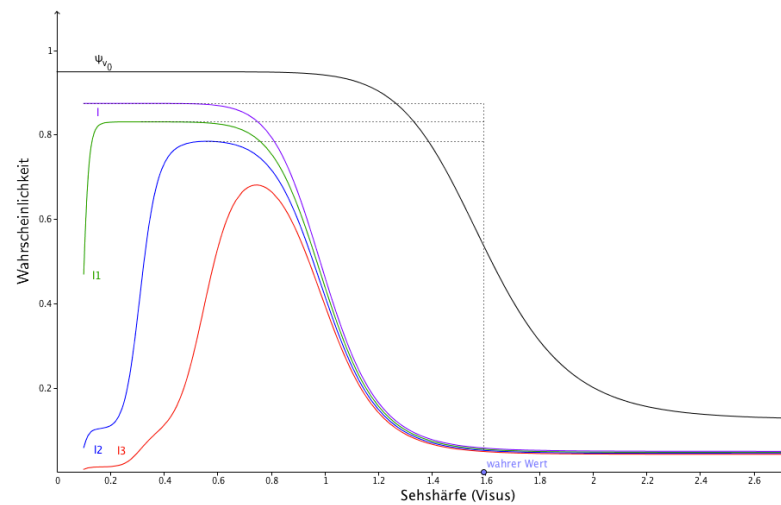
Abbildung 2.14 zeigt die Auswirkungen auf den Likelihoodverlauf, wenn die erste gemachte Aussage falsch ist, obwohl der Proband das Sehzeichen hätte erkennen müssen. Es kann erkannt werden, dass sich die ML in kleiner werdenden Schritten der Steigungsflanke der Falschaussage nähert. Der wahre Wert kann erst erreicht werden, wenn das Maximum der Funktion auf die Höhe der Likelihood bei Visus=1.6 abgesunken ist.

Aus den gemachten Beobachtungen kann gefolgert werden, dass eine widersprüchliche Antwort zu Beginn der Messung im Normalfall von vielen gegenteiligen Antworten gefolgt werden müsste. Auf dieser Basis könnte ein Algorithmus geschrieben werden, der den ersten Messwert verwirft, wenn er von einer bestimmten Anzahl gegenteiliger Antworten gefolgt wird.

2.8.3. Einbeziehen von Vorkenntnissen

Ein großer Vorteil der ML-Methode ist, dass es sehr einfach ist Vorkenntnisse (A-priori-Wahrscheinlichkeiten) über die Lage der Schwelle mit einzubeziehen. Sie

2. Grundlagen/Theorie



Abbildung_{Geo} 2.14.: Auswirkung einer Falschaussage zu Beginn

ψ_{v_0} : Die psychometrische Funktion für die Sehschärfe des Probanden; l : Likelihood für eine falsche Antwort bei Visus=1; l_n : Likelihood nach n richtigen Antworten

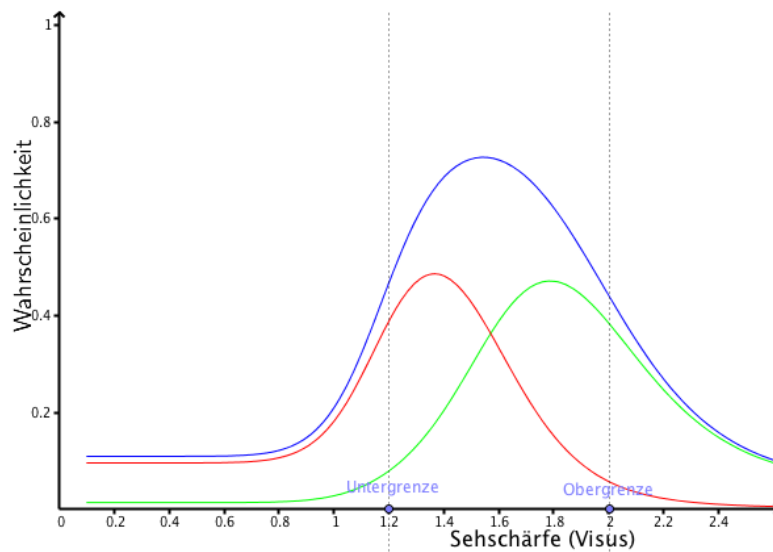
können einfach vor Testbeginn, in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, mit der Likelihood multipliziert werden. So erhält man eine Ausgangslikelihood, die dazu führt, dass der Test schon in einem bevorzugten Bereich beginnt und das Ergebnis, sofern die Vorhersage zutrifft, sehr schnell eingrenzen kann.

Eine einfache Möglichkeit einen solchen Vorhersagebereich zu erzeugen, wäre beispielsweise die Likelihood einer falschen Antwort oberhalb des angenommenen Visus mit der Likelihood einer richtigen Antwort unterhalb des angenommenen Visus zu multiplizieren und diese Kurve als Ausgangslikelihood zu nutzen.

Abbildung 2.15 zeigt eine auf diese Weise erzeugte Funktion (blaue Kurve). Die gestrichelten Linien markieren die Wendepunkte der Funktionen, die zur Erzeugung der Ausgangsfunktion verwendet wurden. Die beiden Kurven unterhalb der blauen Kurve zeigen die Likelihood, nachdem der Proband seine erste Antwort gegeben hat. Es kann erkannt werden, dass das Maximum der Kurven zunächst im bevorzugten Bereich bleibt.

Als Informationsquelle für die Definition eines bevorzugten Sehschärfebereichs kann vor Testbeginn die zentrale Sehschärfe (cc^1) des Probanden ermittelt wer-

¹ mit Korrektur



Abbildung_{Geo} 2.15.: Definition eines Vorhersagebereichs

den.

Wird der Stärkenverlauf des Glases und der damit verbundene voraussichtliche Visusabfall (vgl. Wederz 2006) einbezogen, so könnte die Sehschärfe sogar individuell für jede Blickrichtung eingegrenzt werden.

2.8.4. Nutzen eines passenden Rasters

In der Perimetrie wird sowohl die Größe des Rasters, als auch die Verteilung der Messpunkte der zugrundeliegenden Fragestellung angepasst. Diese Vorgehensweise kann natürlich auch bei der blickwinkelabhängigen Visuserfassung genutzt werden.

Auch bei der Auswahl des Rasters könnte der Stärkenverlauf des Glases mit einbezogen werden und die Messpunkte so angeordnet werden, dass die Punktdichte in Bereichen, wo eine starke Visusschwankung zu erwarten wäre, höher ist.

Wird der Testablauf so gewählt, dass die Sehschärfe Messpunkt für Messpunkt ermittelt wird, könnte auch zunächst ein grobes Raster gemessen werden, auf dessen

2. Grundlagen/Theorie

Grundlage dann der Vorhersagewert für dazwischen liegende Punkte eingegrenzt wird. (Die Einbeziehung bereits ermittelter, benachbarter Orte wird bei der SITA¹-Strategie genutzt(vgl. Bengtsson & Heijl 1998))

¹ **S**wedisch **I**nteractive **T**hreshold **A**lgorithm

3. Das Programm

Im Folgenden wird das im Rahmen der Bachelorarbeit entwickelte Programm zur blickwinkelabhängigen Messung der Sehschärfe beschrieben. Hierbei soll sowohl auf die Bedienung, als auch auf die programmiertechnische Umsetzung einiger der in Abschnitt 2 „Grundlagen/Theorie“ (S. 5) beschriebenen Punkte eingegangen werden.

Das Programm selbst wird dieser Bachelorarbeit in Form einer CD beigelegt.

3.1. Benennung des Programms

Auf Anregung von Prof. Dr. Peter Baumbach fiel die Wahl des Projektnamens auf AVATAR¹.

Der Name leitet sich von der Zielsetzung des Projekts hinsichtlich der Messung der Sehschärfe auch im Unschärfebereich (Residuum) eines Glases ab. Außerdem ergibt sich durch die Abkürzung ein einprägsames Wort.

3.2. Die Programmiersprache

Ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl einer geeigneten Programmiersprache zur Erstellung des Programms ist die Möglichkeit das Programm auf möglichst vielen Plattformen laufen lassen zu können. Dies gilt sowohl für verschiedene

¹ Aalener Visual Acuity Test Around Residuum

3. Das Programm

Betriebssysteme, als auch für die Möglichkeit das Programm beispielsweise für Nahtests auf Tablets laufen lassen zu können.

Außerdem soll die Programmiersprache eine einfache Ankopplung an bereits an der Hochschule vorhandener Systeme zur Erfassung der Kopfposition und Blickrichtung gewährleisten. Da diese Systeme auf C++ basieren, liegt die Auswahl von C++-Bibliotheken zur Programmierung nahe.

Um die Plattformunabhängigkeit zu gewährleisten, fällt die Wahl auf die C++-Bibliothek Qt (Version: 5.4) (*Qt-Project Homepage* 2014), die speziell für die Entwicklung von Multi-Plattform-Anwendungen optimiert ist und alle gängigen Betriebssysteme inklusive Mobilien Geräten wie Tablets unterstützt.

3.3. Umsetzung im Programm

Im Quellcode des Programms sind selbst geschriebene Methoden und Klassen mit kurzen Beschreibungen in Form von Kommentaren versehen. Diese Kommentierung wurde so angelegt, dass sie mit Hilfe des frei erhältlichen Doxygen (van Heesch 2015) automatisch in eine eigenständige Quellcodedokumentation umgewandelt werden kann, in der ein Überblick über die Funktion der einzelnen Elemente gewonnen werden kann, ohne direkt im Quellcode nachsehen zu müssen.

Diese Dokumentation wird dieser Arbeit (CD im Anhang) beigelegt. Darüber hinaus sind, besonders bei längeren Algorithmen, weitere Kommentare im Quellcode enthalten, die den Ablauf strukturieren und Zwischenschritte verdeutlichen sollen.

Hier wird auf die zugrunde liegende Struktur des Programms und exemplarisch auf die Umsetzung einiger im Theorieteil beschriebenen Zusammenhänge eingegangen.

3.3.1. Datenstruktur

Die für AVATAR erstellten Klassen lassen sich in drei Gruppen einteilen:

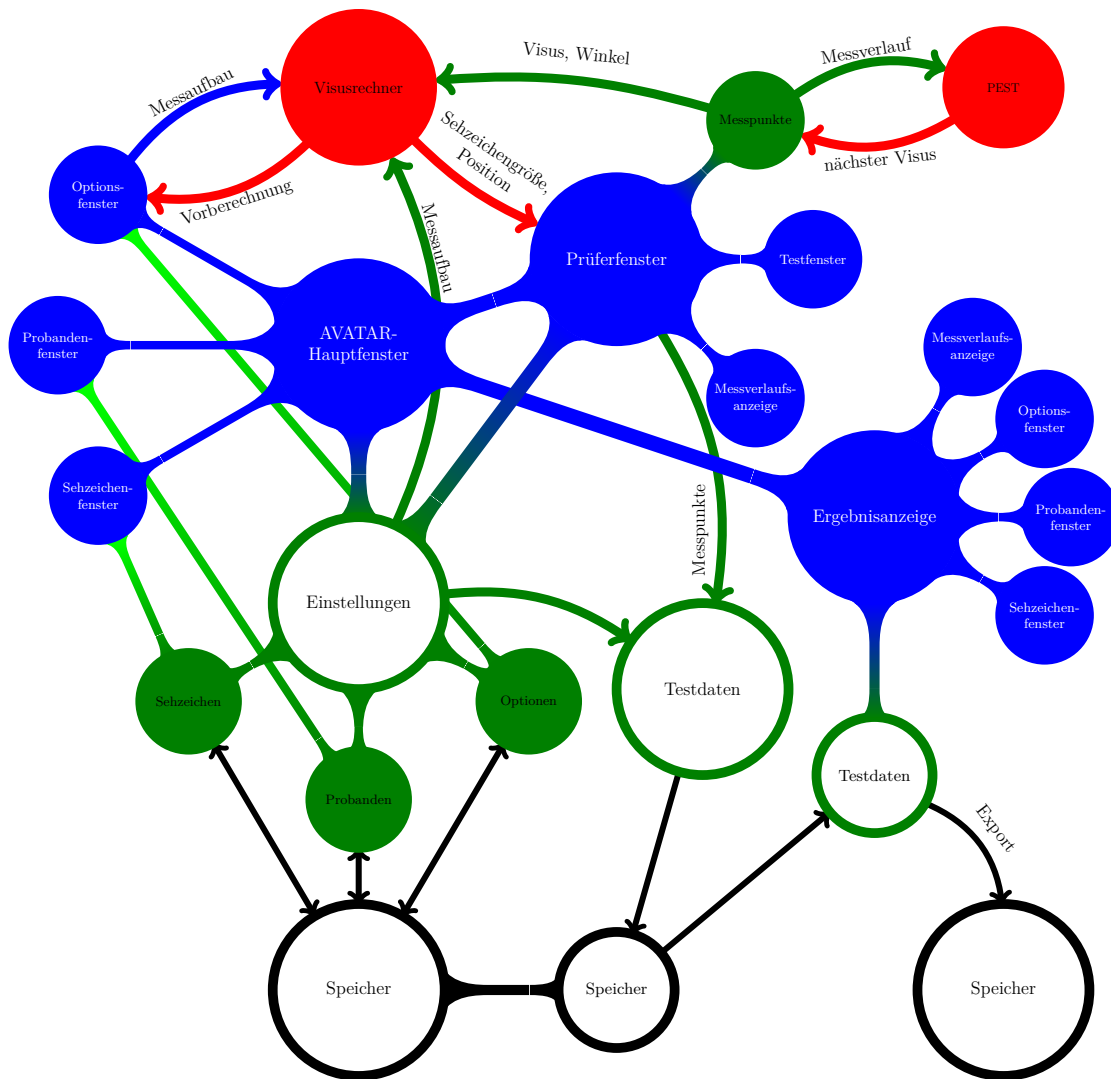


Abbildung 3.1.: Übersicht AVATAR

(*Green*), (*Benutzeroberfläche*), (*Berechnung*), (*permanenter Speicher*)
gefüllte Punkte werden im Programm durch Objekte eigener Klassen
repräsentiert, die Benutzeroberfläche ist von links nach rechts analog
zu einem typischen Programmablauf angeordnet

3. Das Programm

Die Datenklassen haben die Hauptfunktion Daten zu beinhalten und den Zugriff auf diese zu strukturieren und damit überschaubarer zu machen.

Rechenklassen beinhalten die Algorithmen zur Berechnung der Sehzeichengrößen, Raster, PEST etc.

Die Benutzeroberfläche dient als Schnittstelle, die dem Nutzer die Bedienung des Programms ermöglicht.

Abbildung 3.1 soll einen groben Überblick über die Datenstruktur des Programms vermitteln. Die verschiedenen Klassentypen sind zur besseren Unterscheidbarkeit farblich hervorgehoben. Der Benutzer beginnt beim Programmstart immer im Hauptfenster und kann sich von dort, über das Menü und andere Bedienelemente, entlang der blauen Verbindungen zu den anderen Benutzeroberflächenelementen bewegen. Elemente, die nicht in blau dargestellt sind, verdeutlichen die wichtigsten Prozesse, die im Hintergrund ablaufen.

Auf die Benutzeroberfläche wird in Abschnitt 3.4 „Benutzeroberfläche/Bedienung“ (S. 44) genauer eingegangen. Im Folgenden wird die Umsetzung einiger im Theorie-teil gemachter Überlegungen genauer erläutert.

Alle Datenklassen besitzen eine „toStream“- und eine „fromStream“-Funktion. In diesen Funktionen werden die enthaltenen Informationen in den Datenstream, der der Funktion als Argument übergeben wird, geschrieben oder aus diesem abgerufen. Dies ermöglicht Inhalte von Objekten der Datenklassen in jeder Kombination und Reihenfolge in Dateien zu speichern oder aus diesen abzurufen. Es muss nur beachtet werden, dass die Objekte in derselben Reihenfolge abgerufen werden, wie sie in die Datei geschrieben wurden. So werden beispielsweise am Ende einer Messung, alle Messpunkte zusammen mit den Einstellungen, dem Probanden und den verwendeten Sehzeichen in einer Datei gespeichert.(Listing 3.1).

```
1 void PrueferAnsicht::speichereErgebnisse()  
2 {  
3     [...]  
4     QDataStream out(&file);  
5     out.setVersion(QDataStream::Qt_5_3);  
6     prob->toStream(out);    //<-Probanden  
7     opt->toStream(out);    //<-Einstellungen
```

```
8 | out<<zeit;
9 | out<<mPsFertig.length();
10 | for(int i=0;i<mPsFertig.length();i++){
11 |     mPsFertig.at(i)->toStream(out);    //<-Messpunkte
12 | }
13 | szs->toStream(out);    //<-verwendete Sehzeichen
14 | file.flush();
15 | file.close();
16 | }
```

Listing 3.1: Speichern von Datenobjekten

3.3.2. Sehzeichengröße/-position

Eine wichtige Funktion, die das Programm mitliefern muss, ist die Verknüpfung von Pixeln auf dem Anzeigemedium mit Blickwinkeln. Außerdem muss hierbei berücksichtigt werden, dass das Sehzeichen in der Regel in einer Ebene projiziert wird und sich daher auch die Beobachtungsentfernung mit den Blickwinkeln ändert.

Die Berechnungen, die hierfür nötig sind, werden in der Klasse „Visusrechner“ beschrieben. Darüber hinaus werden vor der Berechnung alle nötigen Parameter, die den räumlichen Aufbau beschreiben, an die Klasse übergeben. Da hierbei viele Parameter aus der „Optionen“-Klasse übergeben werden müssen, wurde zur Vereinfachung eine Funktion „anVisusrechner“ geschrieben. Mit dieser können die Einstellungen automatisch an ein Visusrechnerobjekt übergeben werden können.

Um die Entfernung zu verschiedenen Punkten auf der Messfläche zu berechnen, müssen die Parameter zunächst in ein dreidimensionales Koordinatensystem übertragen werden.

Aufbau des Koordinatensystems

Das Koordinatensystem wird so gewählt, dass sich sein Ursprung in der Mitte der Bildfläche befindet und die Skalierung in Metern ist. Die Achsen des Koordinaten-

3. Das Programm

systems sind wie folgt orientiert (vgl. Abbildung 2.13):

x zeigt aus der Projektionsebene horizontal in den Raum (in Richtung des Probanden)

y liegt horizontal in der Projektionsebene von links nach rechts

z liegt vertikal in der Projektionsebene von unten nach oben

So entsteht ein rechtshändiges, dreidimensionales Koordinatensystem, in dem nur noch die Position des Beobachters beschrieben werden muss.

Die Beobachterposition wird durch die Funktion „setup3D“ (Listing F.2) gesetzt, die immer aufgerufen wird, wenn sich der Messaufbau ändert. Sie übernimmt darüber hinaus die Zentrierung des Rasters. Da sowohl die Augenhöhe, als auch die Höhe der Unterkante des Anzeigemediums (phoehe) vom Boden aus gemessen wird, wird in Zeile 3 zunächst die vertikale Position des dreidimensionalen Vektors auf das bereits beschriebene Bezugssystem angepasst.

Ergänzung: Da die Sehzeichen bei schrägem Blick auf die Fläche durch den Tiefenversatz auch zunehmend in sich verzerrt werden, wird abgesehen von der PD¹ keine weitere horizontale Positionsänderung berücksichtigt. Der Test sollte so aufgebaut werden, dass der Proband zentral vor dem Bildschirm positioniert werden kann.

Position

Die bereits in Abschnitt 2.7 „Beschreibung von Blickrichtungen“ (S. 19) näher beschriebenen Koordinatensysteme werden durch die Funktion „andereRichtung“ berechnet. (Listing F.3) Abbildung 3.3 zeigt den Ablauf der Bestimmung des (kartesischen) Blickrichtungsvektors für eine, über einen vertikalen und einen horizontalen Winkel, angegebene Blickrichtung. Wie erkannt werden kann, gibt die Funktion einen Richtungsvektor zurück. Dieser zeigt vom Probandenstandpunkt auf den entsprechenden Punkt in der Projektionsebene.

¹ Pupillendistanz

3.3. Umsetzung im Programm

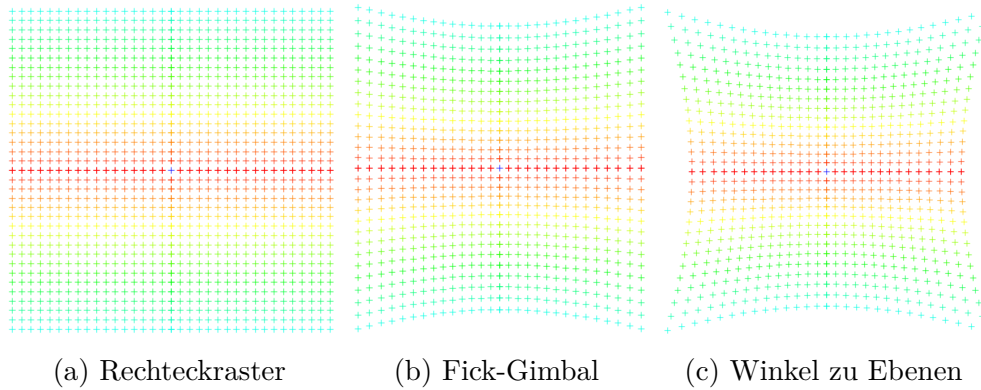


Abbildung 3.2.: Blickwinkel-Raster (Screenshot aus der Rastervorschau in AVATAR)

Der Betrag des vertikalen Winkels ist farblich hervorgehoben

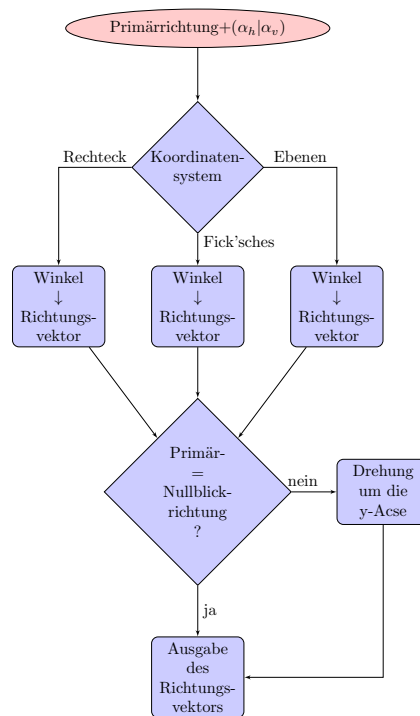


Abbildung 3.3.: Schematische Darstellung der Bestimmung der Rasterpunkte (Listing F.3)

3. Das Programm

Rechteckraster: Zur Umwandlung der Winkel in einen Richtungsvektor wird bei Rechteckkoordinaten die Länge eines Grades bei senkrechtem Blick auf die Projektionsebene bestimmt. Dieser Wert wird mit den Winkeln multipliziert. So erhält man die Koordinaten des Rechteckrasters in der Projektionsebene ($x=0$).

$$\text{Zielpunkt} = \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_h \cdot \text{eingrad} \\ \alpha_v \cdot \text{eingrad} \end{pmatrix}$$

Die Richtung wird ermittelt, indem die Augenposition vom Zielpunkt abgezogen wird.

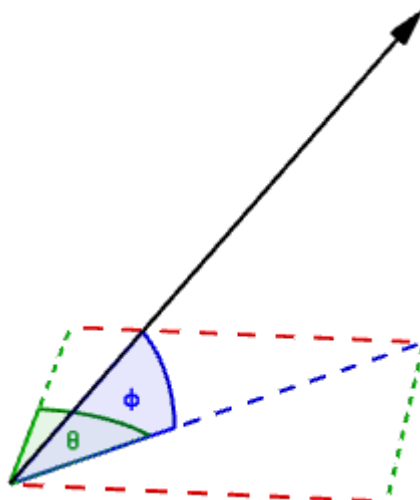


Abbildung 3.4.: Darstellung der Winkel im Fick-Gimbal (ohne Torsion)

Fick-Gimbal: Im Fick-Gimbal wird der Winkel, der die horizontale Drehung beschreibt als θ bezeichnet, der vertikale Winkel als ϕ (vgl. Abbildung 2.11). Abbildung 3.4 soll veranschaulichen, wie die Winkel am Blickrichtungsvektor anliegen.

Aus der Grafik ist ersichtlich, dass die Winkel wie folgt in einen Vektor übertragen

werden können:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \tan \theta \cdot |\Delta x| \\ \tan \phi \cdot \sqrt{\Delta x^2 + (\tan \theta \cdot |\Delta x|)^2} \end{pmatrix}$$

Ebenen Modell: Da die Herleitung zu diesem Koordinatensystem einen größeren Umfang hat, kann sie im Anhang (Abschnitt C „Berechnung des Ebenenrasters“ (S. XIX)) eingesehen werden.

Der Richtungsvektor wird wie folgt über die Winkel beschrieben:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \pm \sqrt{\frac{\tan^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2 \cdot (1 + \tan^2(\alpha_v))}{(1 - \tan^2(\alpha_h) \cdot \tan^2(\alpha_v))}} \\ \pm \sqrt{\frac{\tan^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 \cdot (1 + \tan^2(\alpha_h))}{(1 - \tan^2(\alpha_v) \cdot \tan^2(\alpha_h))}} \end{pmatrix}$$

Anpassung der Orientierung des Kopfes: Wie in Abschnitt 2.7 „Beschreibung von Blickrichtungen“ (S. 19) beschrieben, wird davon ausgegangen, dass die Kopfposition des Probanden konstant bleibt. Verlaufen die Achsen des augengebundenen Koordinatensystems in Primärstellung parallel zu den Achsen des räumlichen Koordinatensystems (Nullblick-Zentrierung), so kann der Vektor unverändert ausgegeben werden. Für den Fall, dass eine Zentrierung an der Bildschirmmitte gewählt wurde, wird der Vektor vertikal gedreht, bis die Primärposition auf die Bildschirmmitte zeigt.

Sehzeichengröße

Die Sehzeichengröße wird der individuellen Entfernung, die die Projektionsebene unter einem bestimmten Blickwinkel zum Beobachter hat, angepasst. Um die Entfernung zu bestimmen wird zunächst der Richtungsvektor bestimmt, bis zur Bildfläche verlängert und anschließend seine Länge ausgegeben:

```
1 | qreal Visusrechner::entfernung(QPointF winkel)
2 | {
3 |     QVector3D richtung;
```

3. Das Programm

```
4 | richtung=raster_ursprung-ap; //Nullrichtung
5 | richtung=aendereRichtung(richtung,winkel);
6 | richtung=richtung*(qAbs(ap.x()/richtung.x())); //Vektor bis ↵
   | ↵ zur Bildflaeche verlaengern
7 | return richtung.length();
8 | }
```

Listing 3.2: Bestimmen der individuellen Entfernung

3.3.3. Schwellenermittlung

Der gesamte Testablauf wird über die Prüferansicht gesteuert. Hier befinden sich auch die für die Schwellenermittlung genutzten Objekte und Methoden.

Umsetzung des PEST-Algorithmus

Die zur Ermittlung der ML notwendigen Berechnungen werden in einer eigenen Klasse mit dem Namen PEST beschrieben.

Diese Klasse beinhaltet im wesentlichen die psychometrische Funktion (Funktionsname: psi) und einen Vektor, in dem für jede Visusstufe eine Likelihood gespeichert wird.

Werden der Klasse neue Daten übergeben (Funktion „addMesswert“) so werden die Likelihood-Werte für jede Visusstufe mit dem entsprechenden Funktionswert der psychometrischen Funktion und dem Korrekturfaktor (vgl. Abschnitt 2.6.3 „Maximum-Likelihood“ (S. 16)) multipliziert. (Listing 3.3)

```
1 | void PEST::addMesswert(qreal visus , bool richtig)
2 | {
3 |     qreal chance, k;
4 |     for(int i=0; i<l_v0.length();i++){
5 |         k=qPow(p+(1-(p+fq))/2,1); //Wahrscheinlichkeit am ↵
   |         ↵ Wendepunkt
6 |         if(richtig){
7 |             chance=psi(visus,l_v0.at(i)->gibV0()); //chance fuer ↵
   |             ↵ eine richtige Antwort
8 |         }
```

3.3. Umsetzung im Programm

```
9      else{
10         chance=1-psi(visus,l_v0.at(i)->gibV0());//chance fuer ↵
           ↵ eine falsche Antwort
11         k=1-k; //Wahrscheinlichkeit am Wendepunkt
12     }
13     k=qPow(k,-1);//Korrekturfaktor
14     l_v0.at(i)->setzLikelihood(l_v0.at(i)->gibLikelihood()*chance*k);
15 }
16 }
```

Listing 3.3: Hinzufügen eines Messwerts

Das Maximum der Verteilung kann dann ermittelt werden, indem eine Schleife die Likelihoodwerte durchläuft und am Ende den Visus mit dem höchsten Wert ausgibt. (Listing 3.4)

```
1  qreal PEST::gibMaximum()
2  {
3      if(l_v0.at(0)->gibLikelihood()==1 && !vorkenntnisse){ ↵
           ↵ //wenn der Likelihood-verlauf noch kein Maximum hat:
4          int mw=qRound(l_v0.length()/2.0);
5          return l_v0.at(mw)->gibV0();
6      }
7      else{
8          qreal max=0;
9          for(int i=0; i<l_v0.length();i++){
10             if(l_v0.at(max)->gibLikelihood()<l_v0.at(i)->gibLikelihood()){
11                 max=i;
12             }
13         }
14         return l_v0.at(max)->gibV0();
15     }
16 }
```

Listing 3.4: Ermitteln des Maximums

3.3.4. Fehler am Anfang

Wie in Abschnitt 2.8.2 „Fehler am Anfang der Messung“ (S. 25) beschrieben, kann eine fehlerhafte Aussage zu Beginn des Tests zu einer erheblichen Erhöhung

3. Das Programm

der notwendigen Darbietungszahl bei einem Messpunkt führen. Die beschriebene Möglichkeit zur Identifikation und Entfernung von Falschaussagen wird in der Klasse „PrueferAnsicht“ in Form der Methode „pruefePlausibilitaet“ (Listing 3.5) umgesetzt. Die Funktion wird im Messablauf abgerufen, wenn die Plausibilitätsprüfung in den Einstellungen aktiviert wurde.

```
1 void PrueferAnsicht::pruefePlausibilitaet()
2 {
3     bool startwert,falsch; int ↵
4         ↵ wiederholungen=opt->getPlausWiederholung();
5     if(mV->length()>wiederholungen){
6         startwert=mV->first()->gibRichtig();// mV: Messverlauf
7         for(int i=1;i<=wiederholungen;i++){
8             if(mV->at(i)->gibRichtig()!=startwert){
9                 falsch=true;
10            }
11            else{
12                falsch=false;
13                break;
14            }
15        }
16        if(falsch){
17            mV->removeFirst();
18        }
19    }
```

Listing 3.5: Die Funktion „pruefePlausibilitaet“

Abbildung 3.5 zeigt die Erhöhung der Darbietungszahl bei einer fehlerhaften Aussage zu Beginn ohne Plausibilitätsüberprüfung.

Abbildung 3.6 zeigt den Messverlauf für vier Darbietungen mit einer Falschaussage zu Beginn.

Der weitere Verlauf, mit aktiver Plausibilitätsüberprüfung (für vier Wiederholungen), wird in Abbildung 3.7 gezeigt. Die Antworten nach dem Umschlag sind so gesetzt, wie sie zu erwarten wären, wenn die Plausibilitätsüberprüfung versagt. Es kann erkannt werden, dass die Werte sich vergleichsweise schnell dem Umschlagpunkt nähern.

3.3. Umsetzung im Programm

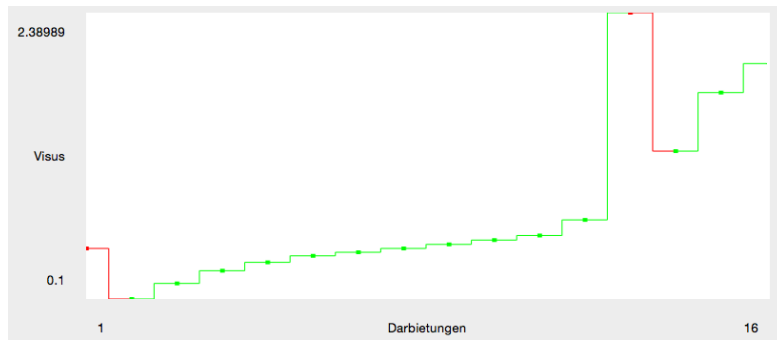


Abbildung 3.5.: Screenshot einer Messung bei dynamischem Abbruchkriterium mit einer Falschaussage am Anfang

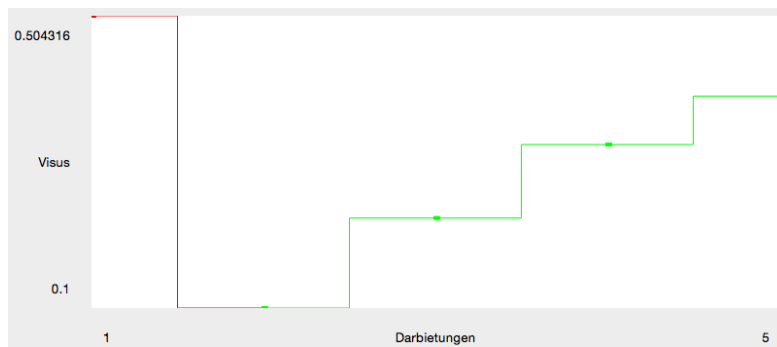


Abbildung 3.6.: Messverlauf für die ersten vier Darbietungen

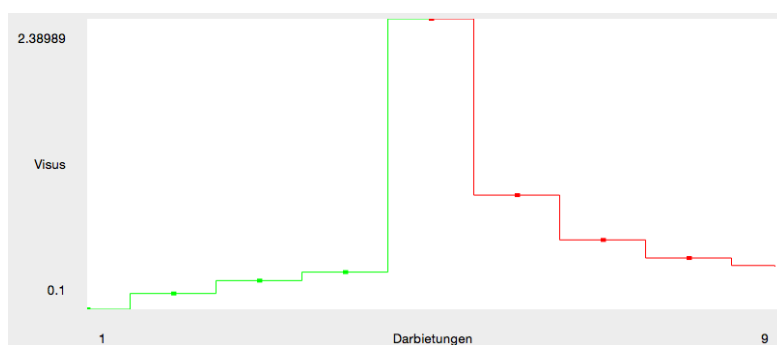


Abbildung 3.7.: Weiterer Messverlauf

3.3.5. Sehzeichen

Als Vektorgrafik

Vektorgrafiken sind Computergrafiken, die Bilder anhand von einfachen geometrischen Objekten (Punkte, Kreise, Linien...) beschreiben. Diese Objekte können durch Angabe weniger Eigenschaften vollständig beschrieben werden (z.B. bei einem Kreis durch die Lage seines Mittelpunkts und dem Radius). Beinhaltet eine Grafik nur wenige einfache Objekte, so kann sie als Vektorgrafik sogar wesentlich effektiver gespeichert werden, als wenn der Wert jedes einzelnen Pixels gespeichert wird.

Da Sehzeichen sich in der Regel aus einfachen geometrischen Objekten zusammensetzen bietet sich eine Speicherung in diesem Format an.

Der entscheidende Vorteil, weshalb sich Vektorgrafiken besonders für die Speicherung von Sehzeichen eignen, ist aber, dass Sie sich verlustfrei vergrößern und verkleinern lassen. Sie stellen eine Objektbeschreibung analog zu den in Abschnitt 2.4.2 „Antialiasing“ (S. 11) beschriebenen Mustern (Abbildung 2.4 obere Reihe) dar.

Das Dateiformat: Die Wahl fällt hier auf das *.svg-Format, ein verbreitetes Dateiformat, das mit Qt einfach geladen und angezeigt werden kann. Auch die standardmäßig im Programm enthaltenen Landoltringe liegen in diesem Format vor.

Möchte man eigene Sehzeichen erstellen, so können diese in einem Grafikprogramm, das Vektorgrafiken unterstützt, einfach erstellt werden. Hierbei ist es sinnvoll das Sehzeichen auf einer quadratischen Grundfläche zu zeichnen und die Größe des kritischen Details beim Import in's Programm relativ zur Kantenlänge anzugeben.

Antialiasing in Qt

Die theoretischen Grundlagen zu Antialiasing werden in Abschnitt 2.4.2 „Antialiasing“ (S. 11) beschrieben.

Sehzeichenmuster in Form von Vektorgrafiken abzurufen bringt den Vorteil, dass die Kontur des Sehzeichens erst beim Übertragen auf ein Raster „verpixelte“ wird. Kommt hierbei Antialiasing zum Einsatz, so kann die vom Sehzeichen überdeckte Teilfläche eines Pixels sehr genau ermittelt werden. Die Umsetzung von Antialiasing gestaltet sich in Qt vergleichsweise einfach. Beim Zeichnen von Objekten kann als Option angegeben werden, ob Antialiasing verwendet werden soll. Ist die Option gesetzt, so prüft Qt zunächst, ob Antialiasing unterstützt wird. Ist dies nicht der Fall, so werden die Graustufen von Qt durch Anpassung des Alphawerts der Rastergrafik eingestellt.

„If a feature is not supported by the engine, QPainter will do a best effort to emulate that feature through other means and pass on an alpha blended QImage to the engine with the emulated results. [...]“ (*Klassendokumentation QPainterEngine* 2015)

Farbwerte werden standardmäßig in Bytes abgespeichert. Damit stehen 256 unterschiedliche Graustufen zur Anwendung von Antialiasing zur Verfügung. Rechnet man diese Stufen auf, gleichmäßig über ein Pixel verteilte, Subpixel um, so erhält man 16×16 Subpixel und es könnte somit eine Höhenänderung von $\frac{1}{16} \times \text{Pixelhöhe}$ simuliert werden. Hierbei sollte aber beachtet werden, dass auch die Helligkeitswahrnehmung Grenzen unterliegt. Die Feinheit der Abstufung wird spätestens durch das Kontrastaufklärungsvermögen des Probanden begrenzt.

Auf Grundlage der oben gemachten Überlegungen müsste der erzielbare Effekt mit Antialiasing am besten sein, wenn die Rahmenbedingungen so gewählt werden, dass hohe Kontraste dargestellt werden können. Ergänzend sollte das Anzeigemedium γ -kalibriert werden, um sicherzustellen, dass der Helligkeitsverlauf möglichst gut der Helligkeitswahrnehmung angepasst ist.

Insbesondere bei sehr kleinen Landoltringen, wie in Abbildung 3.8, sollte immer im Hinterkopf behalten werden, dass die Lücke unter Umständen nur durch Graustufen

3. Das Programm

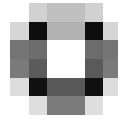


Abbildung 3.8.: In Qt mit Antialiasing gezeichneter Landoltrings mit einer Höhe von fünf Pixeln

dargestellt wird, die Größe der Lücke also durch einen geringeren Kontrast simuliert wird.

3.4. Benutzeroberfläche/Bedienung

Die Benutzeroberfläche wurde mit Hilfe des im Qt-Creator enthaltenen Designmodus erstellt. Hierbei wurden die Eingabefelder nach Möglichkeit so ausgelegt, dass keine sinnlosen Eingaben (wie z.B. Buchstaben für Entfernungen) gemacht werden können.

Zum besseren Verständnis wurden einige Elemente der Benutzeroberfläche mit Tooltip versehen. Dieser erscheint, wenn man mit der Maus über dem Element verharrt.

3.4.1. Das Hauptfenster

(Abbildung 3.9) Dieses Fenster öffnet sich beim Start des Programms. Hier kann der Proband ausgewählt werden. Außerdem kann ausgewählt werden, ob der Test binokular oder monokular durchgeführt werden soll und ggf. das zu testende Auge. Des Weiteren kann direkt festgelegt werden, ob die Sehzeichen nach jeder Darbietung an einer zufälligen Position dargeboten werden sollen oder ob die Darbietung Messpunkt für Messpunkt geschehen soll. Zudem kann die Dauer zwischen den einzelnen Darbietungen festgelegt und bestimmt werden, ob zwischen den Darbietungen ein Symbol eingeblendet werden soll.

Im FrACT kann nach einer bestimmten Anzahl von Darbietungen ein größeres Sehzeichen dargeboten werden um die Motivation des Probanden zu erhöhen.

3.4. Benutzeroberfläche/Bedienung

Diese Funktion ist in der aktuellen Version von AVATAR nicht enthalten, die freie Auswahl eines Überblendungszeichens ermöglicht allerdings dem Probanden auf diesem Wege ein positives Feedback zwischen den Darbietungen zu vermitteln.

Darüber hinaus kann das Überblendungssymbol genutzt werden, um bei zufälliger Messpunktabfolge den Ort der nächsten Sehzeichendarbietung hervorzuheben.

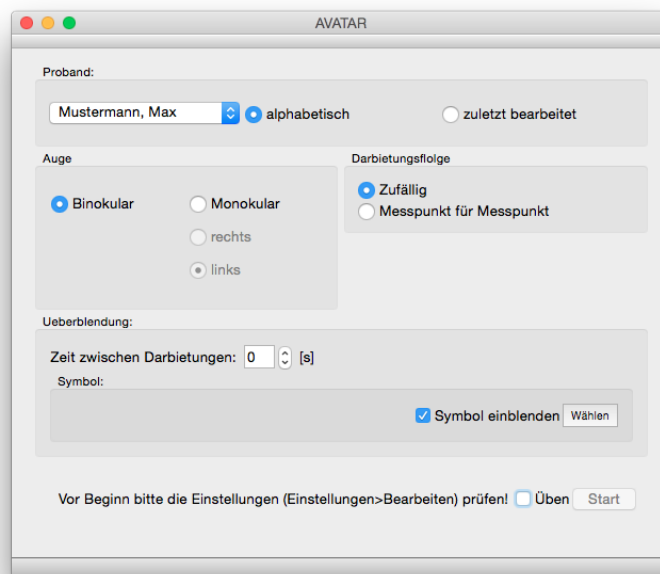


Abbildung 3.9.: Das Hauptfenster des Programms

Über den Startbutton (unten rechts) kann der eigentliche Test (S. 53) gestartet werden. Dieser Button ist nach dem Start des Programms zunächst grau hinterlegt und nicht nutzbar. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die Testeinstellungen vor Messbeginn überprüft werden. Der Benutzer wird über einen Hinweis links neben dem Button informiert, was für die Freigabe des Testmodus nötig ist. Wenn vor Testbeginn ein Häkchen vor der Option "Üben" gesetzt wird, startet der Test im Übungsmodus. In diesem Modus werden nur große Sehzeichen (Visus=0,1) dargeboten, um dem Probanden zu ermöglichen sich an den Testablauf und die

3. Das Programm

Bedienung zu gewöhnen, ohne dass seine Motivation durch sehr kleine Sehzeichen unnötig gesenkt wird.

Die weitere Navigation des Programms passiert über die Menüleiste des Programms. Die Menüleiste beinhaltet folgende Punkte:

Proband Unter diesem Punkt können Probanden angelegt werden (S. 46).

Sehzeichen Hier können die Sehzeichen überarbeitet (S. 47), die aktuelle Zusammenstellung gespeichert und vorher angelegte Sehzeichengruppen geladen werden.

Einstellungen Über diesen Menüeintrag können die Einstellungen bearbeitet, gespeichert und geladen werden (S. 47).

Ergebnisse Hier können die Ergebnisse der gemachten Tests eingesehen werden (S. 54).

3.4.2. Probandenansicht

In der Probandenansicht (Abbildung 3.10) können die Informationen zum Probanden eingetragen werden. Neben Namen und Geburtsdatum kann auch die PD, Refraktionsdaten, sowie der Visus hinterlegt werden.

Soll ein existierender Proband überarbeitet werden, so kann er über das Dropdownmenü ausgewählt werden. Die Änderungen werden nach Drücken des Eintragen-Knopfs übernommen.

Achtung: Stimmen Vor-/Nachname und Geburtsjahr überein, so wird der existierende Proband mit den neuen Informationen überschrieben.

Das Überschreiben von Probanden wirkt sich nicht auf die Probandeninformationen von schon abgeschlossenen Tests aus.

Abbildung 3.10.: Die Probandenansicht

3.4.3. Der Sehzeicheneditor

(Abbildung 3.11) bietet die Möglichkeit Sehzeichen in Form von *.svg-Dateien hinzuzufügen oder Sehzeichen aus dem aktuellen Setup zu entfernen. Dies ermöglicht es dem Prüfer die Sehzeichenzusammenstellung beliebig anzupassen.

Abgesehen davon kann für jedes Sehzeichen individuell eine Bezeichnung, eine beliebige Taste und die Größe des Sehzeichens im Verhältnis zur Gesamthöhe (krit. Detail), festgelegt werden.

3.4.4. Die Testeinstellungen

(Abbildung 3.12-3.16) können über den Menüpunkt Einstellungen erreicht werden. In diesem Fenster können alle nicht direkt probanden-/sehzeichengebundenen

3. Das Programm



Abbildung 3.11.: Der Sehzeichen-Bearbeitungsmodus

Einstellungen vorgenommen werden.

Zur besseren Übersicht wurden die Bedienelemente in drei Abschnitte unterteilt, die über die Tabs im oberen Bereich aufgerufen werden können. Da die Eingaben (z.B. Beobachtungsentfernung und Größe des Anzeigemediums) Einfluss auf die Einstellungsmöglichkeiten in darauf folgenden Bereichen haben, empfiehlt es sich die Tabs in der vorgegebenen Reihenfolge von links nach rechts durchzugehen.

Tab 1 Abbildung 3.12 zeigt den ersten Tab der Testeinstellungen. In diesem Abschnitt kann der generelle Aufbau eingegeben werden.

Anzeigemedium Zu diesen Einstellungen gehört die Auswahl des Bildschirms, auf dem der Test durchgeführt werden soll, aus dem Dropdown-Menü (**Testscreen**) am Anfang des Tabs. Dieses Menü aktualisiert sich immer beim Aufrufen des Einstellungsfensters und wird mit den vom Betriebssystem erkannten Anzeigemedien gefüllt. Die Nummerierung erfolgt analog zu der im System hinterlegten Nummerierung.

Des Weiteren kann die **Breite** des Anzeigemediums manuell festgelegt oder über das Kontrollkästchen, die im System hinterlegten Abmessungen, übernommen werden. Diese sollten aber auf jeden Fall nochmal überprüft werden, da die Größe oft nicht exakt übereinstimmt.

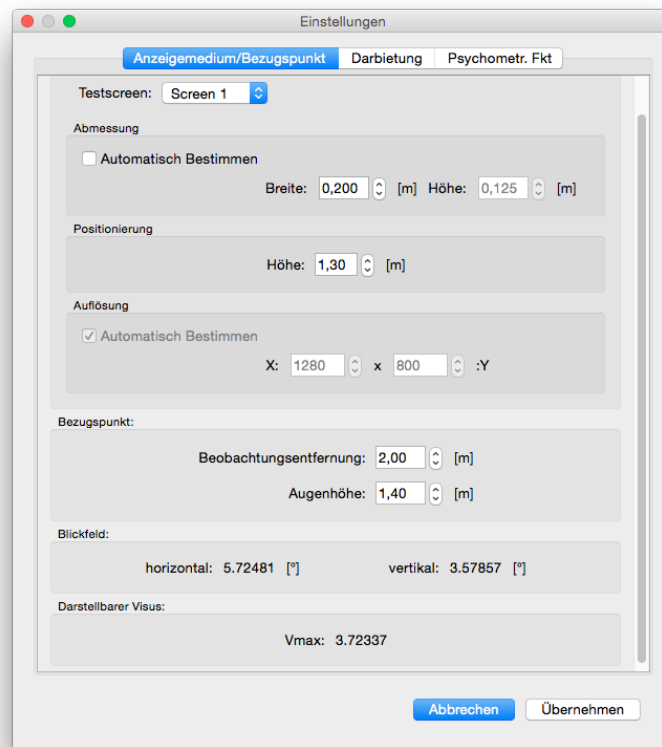


Abbildung 3.12.: Testeinstellungen (Tab 1)

Um die Blickwinkel richtig berechnen zu können, muss außerdem noch der Abstand der Bildschirmunterkante zum Boden eingegeben werden. Diese wird von der Unterkante aus gemessen.

Bezugspunkt In diesem Abschnitt kann die **Beobachtungsentfernung** und die **Augenhöhe** eingegeben werden.

Informationen Am unteren Ende des Tabs werden bei Änderung der Einstellungen automatisch der vom Bildschirm ausgefüllte Winkel und die darstellbare Sehschärfe (gemessen an der Größe eines einzelnen Pixels) angezeigt.

Tab 2 Abbildung 3.13-3.15 zeigen den zweiten Einstellungsabschnitt (Darbietung). Hier können die Einstellungen des Darbietungsrasters und der Ablaufopti-

3. Das Programm

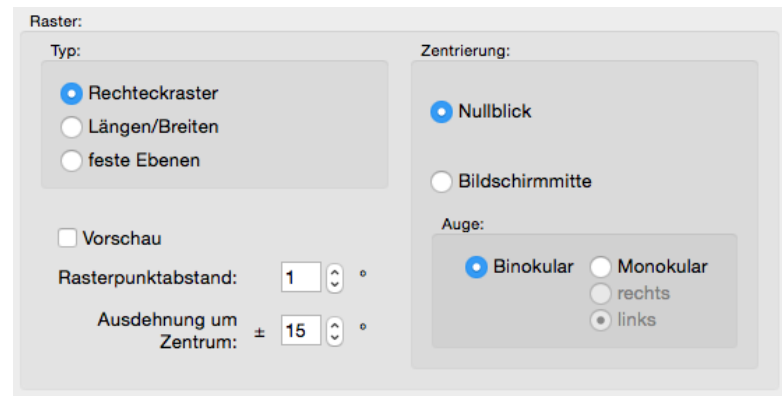


Abbildung 3.13.: Testeinstellungen (Tab2 Rastereinstellungen)

mierungen angepasst werden.

Raster (Abbildung 3.13) Unter diesem Punkt kann festgelegt werden, wie das Darbietungsraster erstellt und zentriert werden soll. Auf Wunsch kann es über das Kontrollkästchen (**Vorschau**) angezeigt werden.

Schwellenermittlung (Abbildung 3.14) Hier können mit den Schieberegler die absoluten Grenzen zwischen denen die Sehschärfe ermittelt werden soll eingestellt werden.

Unter dem Punkt **Visusstufung** kann der Faktor für die Visusabstufung festgelegt werden. Er ist nach unten durch die übliche Abstufung $\sqrt[10]{10}$ und nach oben durch den, unter Zuhilfenahme von Antialiasing, theoretisch erreichbaren Wert von $\frac{17}{16} \text{Pixelhöhe} \approx \text{Pixelhöhe} \cdot \sqrt[37]{10}$ begrenzt.

Im Abschnitt **Optimierungsmaßnahmen** kann gewählt werden:

ob **Visusvorkenntnisse** einbezogen werden sollen. Ist diese Option aktiv, so wird der angegebene Bereich um den Probandenvisus bevorzugt getestet. Die zugrundeliegende Visusstufung ist hierbei $\sqrt[10]{10}$.

Beim **Abbruchkriterium** kann zwischen **statisch** und **dynamisch** unterschieden werden. Ist statisch ausgewählt, so endet die Visusermittlung nach der festgelegten Anzahl von Darbietungen (je Messpunkt). Im dynamischen Modus wird die Schwellenermittlung abgeschlossen nachdem

Schwellermittlung:

Visusuntergrenze: 0.1

Visusobergrenze: 3.1623

Visusstufung: 37 $\sqrt{10}$

Optimierungsmaßnahmen:

☐ Visusvorkenntnisse:

Visus:

V+ 4 Stufe(n)

V- 4 Stufe(n)

☐ Plausibilitätsprüfung:

Falschaussage am Anfang:

Nach: 4 gleichen

Abbruchkriterium:

☒ statisch

16 Darbietungen

☐ dynamisch

max. Likelihood 3 mal

innerhalb \pm 2 Stufe(n)

Abbildung 3.14.: Testeinstellungen (Tab2 Schwellenermittlung)

der geschätzte Sehschärfewert (**max. Likelihood**) X mal hintereinander innerhalb des, in **Stufen** definierten, Wertes liegt. Die hier angegebenen Stufen orientieren sich an der vorher festgelegten Visusstufung.

Die **Plausibilitätsprüfung** kann optional aktiviert werden. Sie sorgt dafür, dass der erste Messwert verworfen wird, wenn er von der angegebenen Anzahl von widersprüchlichen Antworten gefolgt wird.

Weiteres:

Kleinstes Detail: 1 [Pixel]

Abbildung 3.15.: Testeinstellungen (Tab2 Einstellung des kleinsten Details)

Kleinstes Detail (Abbildung 3.15) Unter diesem Punkt kann das kleinste darstellbare Detail in Pixeln festgelegt werden (Standard=1 Pixel). Diese

3. Das Programm

Funktion soll dem Prüfer ermöglichen, die kleinste Sehzeichengröße zu beeinflussen, sofern die in Abschnitt 3.3.5 „Antialiasing in Qt“ (S. 43) beschriebenen Effekte, die bei sehr kleinen Sehzeichen auftreten, ausgeschlossen werden sollen. Dies wird allerdings immer zur Folge haben, dass der Messbereich nach oben begrenzt wird.

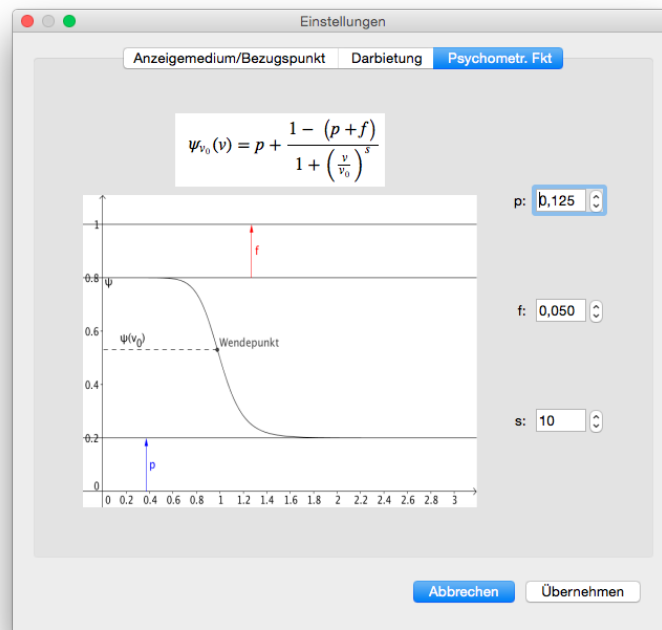


Abbildung 3.16.: Testeinstellungen (Tab3 psychometrische Funktion)

Psychometr. Funktion (Abbildung 3.16) Unter diesem Punkt können die Parameter der psychometrischen Funktion angepasst werden.

p: Ratequote

f: Fehlerquote

s: Steilheit der Funktion

Um die Bedeutung der Parameter zu verdeutlichen enthält diese Seite auch eine exemplarische Darstellung der Funktion.

3.4.5. Testmodus



Abbildung 3.17.: Die Prüferansicht während des Tests erscheint automatisch auf dem Hauptbildschirm

Im Testmodus werden die Sehzeichen entsprechend der gemachten Einstellungen auf dem gewählten Bildschirm angezeigt. Abbildung 3.17 zeigt die, parallel zum Test, auf dem Hauptbildschirm angezeigten, Prüferinformationen. Sie enthalten eine Abbildung des aktuell angezeigten Sehzeichens, die Größe, unter der das aktuelle Sehzeichen dem Proband erscheint, die Zahl der Darbietungen, die schon am aktuellen Punkt gemacht wurden, die Zahl der noch nicht abgeschlossenen Messpunkte und die seit Testbeginn verstrichene Zeit.

Ergänzend zu dieser allgemeinen Zusammenfassung wird in einem weiteren Fenster der Darbietungsverlauf zum aktuellen Messpunkt als Liniendiagramm dargestellt. Im Diagramm werden die einzelnen Messereignisse als Punkte der Reihe nach von links nach rechts aufgetragen. Die zugehörige Sehzeichengröße entspricht der Höhe der Punkte im Diagramm. Um eindeutig darzustellen, ob die Antwort bei einer Darbietung richtig war, werden die Punkte und die darauf folgenden Linien, abhängig von der Antwort in grün/rot dargestellt. Der Messverlauf kann jederzeit durch Drücken der „->csv“-Taste am unteren Rand als csv-Tabelle exportiert werden. Diese Funktion kann auch bei der nachträglichen Betrachtung der Messergebnisse genutzt werden.

3. Das Programm

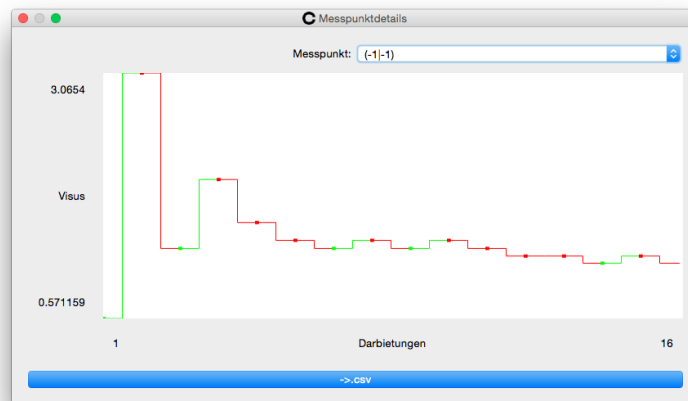


Abbildung 3.18.: Der Darbietungsverlauf

Der Test kann jederzeit durch Drücken der „esc“-Taste oder durch Schließen der Prüferansicht abgebrochen werden. Sollte der Test auf dem Hauptbildschirm des Systems ausgeführt werden, kann die Prüferansicht durch Drücken der „Tabulator(\leftrightarrow)“- oder der „Backspace(\leftarrow)“-Taste aus- / und wieder eingeblendet werden.

Sobald der Test abgeschlossen ist, werden die Ergebnisse und die Einstellungen automatisch in einer Datei, die mit dem Namen des Probanden und dem aktuellen Datum benannt wird, gespeichert. Die gespeicherten Informationen können dann im Ergebnisteil angesehen und weiterverarbeitet werden.

3.4.6. Ergebnisanzeige

Wird im Menü der Punkt Ergebnisse ausgewählt, so öffnet sich ein Fenster, in dem die gewünschte Messung, in Form einer mit Namen des Probanden und Datum der Messung benannten Datei, ausgewählt werden kann.

Nach Auswahl der gewünschten Datei wird der Inhalt der Datei geladen und im, in Abbildung 3.19 dargestellten, Fenster angezeigt. Die eigentliche Darstellung des gemessenen Rasters geschieht im Zentrum des Fensters in Form eines Konturdiagramms.

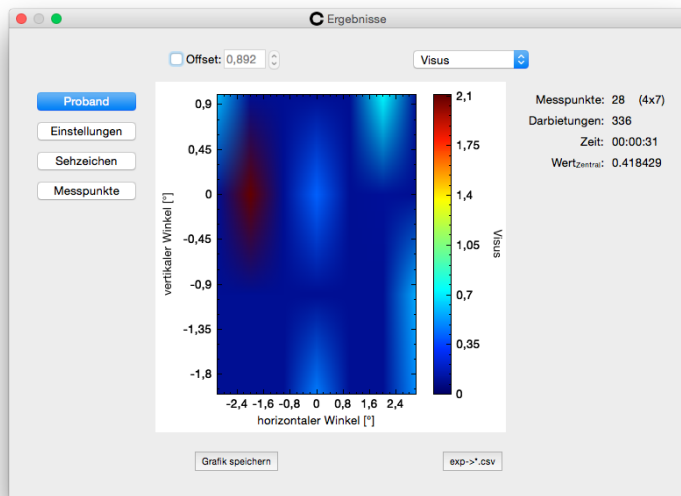


Abbildung 3.19.: Die Ergebnisansicht

Das Konturdiagramm wird mit dem, zur graphischen Darstellung von Daten entwickelten, Qt-Widget `QCustomPlot` (Eichhammer 2015) erstellt. Dieses Widget bringt zusätzlich die Möglichkeit mit, das Diagramm mit der Maus zu bewegen, mit dem Mausrad zu vergrößern, zu verkleinern und auch die Farbskala mit der Maus zu verschieben, sowie mit dem Mausrad zu manipulieren. Über die Buttons unterhalb des Konturdiagramms können die angezeigten Daten als *.csv-Datei exportiert und als Grafik im PDF-Format gespeichert werden.

Am oberen Rand des Fensters kann über das Kontrollkästchen „Offset“ eingestellt werden, ob der dargestellte Visus mit einem Faktor korrigiert werden soll. Neben dem Visus kann in dem daneben befindlichen Dropdown-Menü auch die Messdauer und die Messzeit zur Darstellung ausgewählt werden.

Rechts neben dem Konturdiagramm werden einige allgemeine Informationen zum Test angezeigt und über die Buttons auf der linken Seite können weitere Details aufgerufen werden. Die Darstellung der Details geschieht mit den bereits bekannten Benutzeroberflächenelementen.

4. Messungen

Um einen ersten Eindruck davon zu bekommen, ob die Visusermittlung mit dem erstellten Programm funktioniert und ob hiermit eine Rasteraufnahme eines Gleitsichtglases möglich ist, werden Vergleichsmessungen und erste Rasteraufnahmen durchgeführt. Bei allen Tests werden die Standardsehzeichen (Landoltringe in acht Darbietungsrichtungen) verwendet. Die Antworten werden vom Probanden selbst über eine externe Ziffernblock-Tastatur eingegeben. (Abbildung 4.1)

Alle Tests wurden ohne weitere Fixiermaßnahmen, nur mit der Anweisung die Blickrichtung möglichst konstant zu halten, durchgeführt.

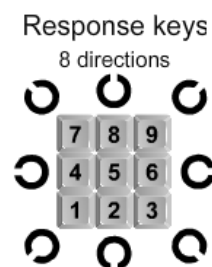


Abbildung 4.1.: Screenshot der Standard-Tastenzuweisung im FrACT

4.1. Vergleichsmessungen

Selbsttest: Die Vergleichsmessungen werden an einem LCD-Monitor mit HDMI-Auflösung und 70 cm Bildschirmbreite in 3,5 m Entfernung durchgeführt. Dieser Testaufbau ermöglicht laut Vorberechnung von AVATAR und FrACT die Darstellung eines Visus von 2,5.

4. Messungen

Vor der Messung wird der Kontrast des Bildschirms maximal eingestellt und eine γ -Kalibrierung durchgeführt. Um die Messungen möglichst gut miteinander vergleichen zu können, wird jeweils immer im Wechsel mit FrACT und AVATAR gemessen. Für die direkten Vergleichsmessungen werden beide Tests gleich eingestellt, d.h. 18 Darbietungen ohne Optimierungsmaßnahmen. Einen kleinen Unterschied in der Einstellung stellt die in AVATAR standardmäßig mit 5% angenommene Fehlerquote dar, die beibehalten wurde.

Abbildung 4.2 veranschaulicht die Ergebnisse erster Messungen im Selbsttest (sc¹). Es handelt sich um drei Messreihen, mit jeweils 10 Einzelmessungen.

Die mit SCHNELL beschriftete Messreihe zeigt die Ergebnisse von AVATAR mit Optimierungsmaßnahmen. Hierfür wird ein Bereich von \pm drei Stufen um den geometrischen Mittelwert der Messreihe „AVATAR“ als bevorzugter Bereich eingestellt. Ergänzend dazu wird ein dynamisches Abbruchkriterium von fünf Wiederholungen innerhalb von \pm einer Stufe gewählt.

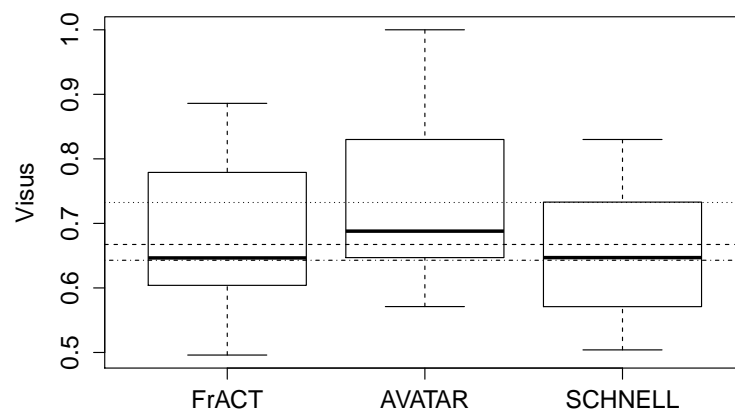


Abbildung 4.2.: Boxplot der Messergebnisse des Selbsttests (sc) (Tabelle E.1)
die horizontalen Linien markieren die (geometrischen) Mittelwerte (von links nach rechts [gestrichelt, punktiert, Strich-Punkt])

Die Darbietungszahlen der Messreihe mit Optimierungsmaßnahmen werden in Abbildung 4.3 dargestellt.

¹ ohne Korrektion

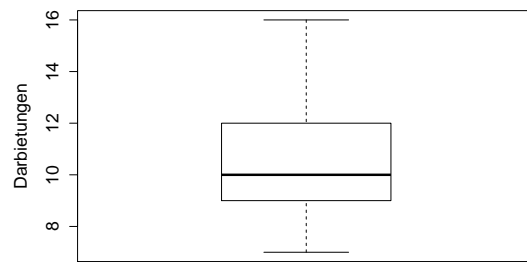


Abbildung 4.3.: Darbietungszahlen zur Messreihe „SCHNELL“ (Tabelle E.1)

Abbildung 4.4 zeigt drei Messreihen mit jeweils 15 Messungen, die im Selbsttest (cc) durchgeführt wurden. Die dritte Messreihe („RASTER“) stammt aus einer Rastermessung mit AVATAR.

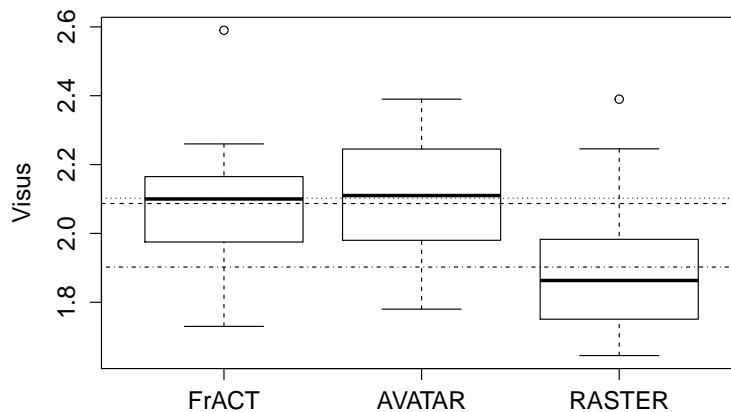


Abbildung 4.4.: Boxplot der Ergebnisse aus dem Selbsttest (cc) Tabelle E.2
die horizontalen Linien markieren die (geometrischen) Mittelwerte (von links nach rechts [gestrichelt, punktiert, Strich-Punkt])

Bei der Rastermessung wird der auf dem Brillenpass angegebene Visus $(1,6) \pm$ einer Visusstufe als Vorwissen und ein, mit drei Wiederholungen innerhalb von \pm einer Stufe, moderateres Abbruchkriterium als bei der Messreihe „SCHNELL“ gewählt.

4. Messungen

Das Raster besitzt 15 Messpunkte mit zwei Grad Abstand. Abbildung 4.5 zeigt das zugehörige Konturdiagramm.

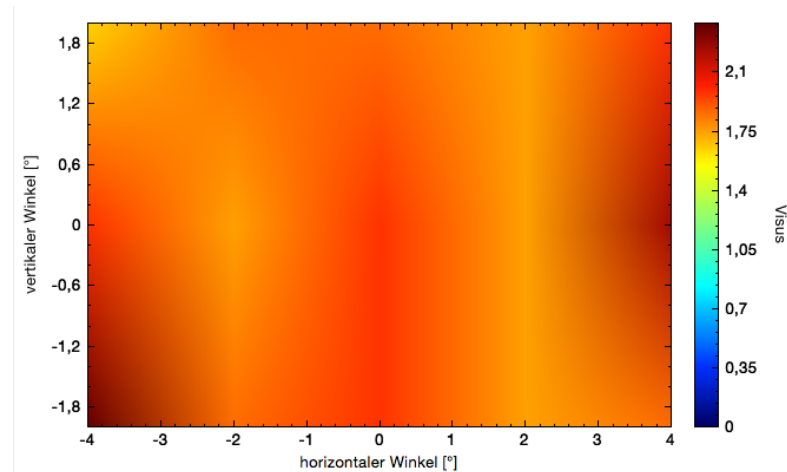


Abbildung 4.5.: Konturdiagramm der Rasteraufnahme im Selbsttest (cc)
Bei Messung ohne Stärkenverlauf ist keine blickwinkelabhängige Schwankung erkennbar.

Bemerkungen: Bei den Selbsttests konnte festgestellt werden, dass die Orientierung auf der Tastatur bei fixer Kopfhaltung, also ohne die Möglichkeit auf die Tastatur zu schauen, auch mit genauer Kenntnis der Tastenanordnung relativ schwierig ist. Dieses Problem wird schon im Zusammenhang mit FrACT beschrieben (vgl. Wesemann 2002, S. 666), hat aber bei einer blickwinkelabhängigen Messung einen noch höheren Einfluss.

Um dem Probanden eine bessere Orientierung auf der Tastatur zu ermöglichen wird für die folgenden Messungen die mittlere Taste des Ziffernblocks entfernt und auf jeder Sehzeilentaste eine Erhebung in Richtung der entsprechenden Lücke befestigt. So kann die Mitte leicht ertastet und im Zweifelsfall auch die Richtung der einzelnen Taste durch Ertasten gefunden werden. (Abbildung 4.6)

Testperson 1: Die im Selbsttest durchgeführten Vergleichsmessungen werden mit einem emmetropen Probanden bei gleichem Versuchsaufbau wiederholt. Der Proband bekommt eine Einweisung in die Bedienung der Tests und es wird je

4.1. Vergleichsmessungen

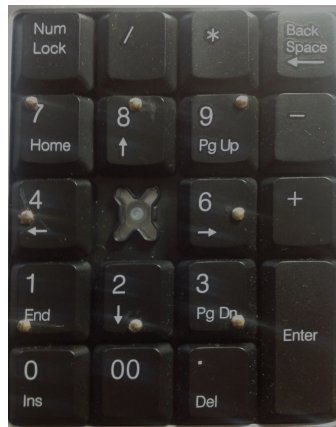


Abbildung 4.6.: Tastatur mit ertastbaren Orientierungspunkten

Test ein ungewerteter Testlauf gemacht. Anschließend werden im Wechsel je 19 Messungen gemacht. (Abbildung 4.7)

Abbildung 4.8 zeigt den Messverlauf der Vergleichsmessung an Testperson 1. Die Werte nehmen im Verlauf der Messungen zu.

Zwischenbilanz: Die Ergebnisse der direkten Vergleichsmessungen zeigen in allen Fällen eine ähnliche Streubreite. Auch die Mittelwerte weisen in jedem Fall Abweichungen auf, die deutlich unterhalb einer Visusstufe liegen. Hierbei scheint die gemachte Rasteraufnahme (Abbildung 4.5) am weitesten von den Vergleichsmessungen abzuweichen. Eine plausible Erklärung für die erhöhte Abweichung liefern die für die Rasteraufnahme gemachten Testeinstellungen, in denen ein sehr enger Bereich um einen niedrigeren Visus als bevorzugter Bereich gewählt wurde. In Kombination mit einem relativ moderaten Abbruchkriterium kann dies dazu führen, dass der Test bei Erreichen der Flanken des Vorhersagebereichs endet (ähnlich dem Effekt in Abschnitt 2.8.2 „Fehler am Anfang der Messung“ (S. 25)).

Im zugehörigen Konturdiagramm (Abbildung 4.5) ist erwartungsgemäß kein winkelabhängiger Visusverlauf erkennbar, was als Hinweis, dass eine Messung außerhalb der Primärstellung vergleichbare Ergebnisse liefert, gewertet werden kann. Diese Folgerung sollte aber, im Hinblick auf die vorausgehenden Feststellungen, mit Vorsicht betrachtet werden.

4. Messungen

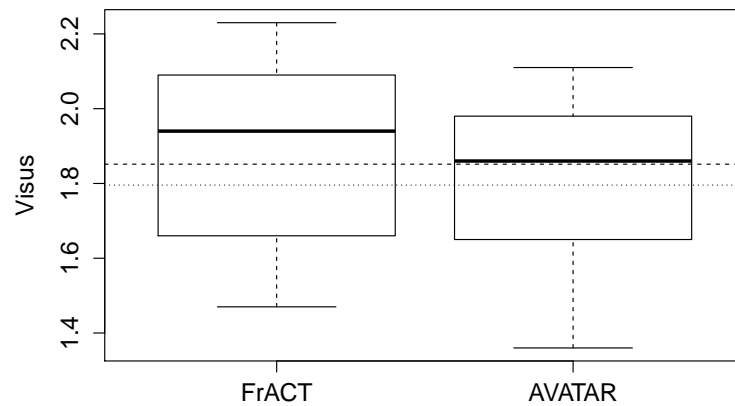


Abbildung 4.7.: Vergleichsmessung Testperson 1 (Tabelle E.3)
die horizontalen Linien markieren die (geometrischen) Mittelwerte (von links nach rechts [gestrichelt, punktiert])

Durch die Einstellungen, wie sie in der Messreihe „SCHNELL“ gemacht wurden, hat sich die Zahl der Darbietungen je Messung verringert. (Abbildung 4.3)

Der Mittelwert der pro Messung gemachten Darbietungen beträgt 10,7 und die maximale Darbietungszahl ist mit 16 Darbietungen noch unterhalb der Standarddarbietungszahl beim FrACT. Gleichzeitig scheint sich die Streubreite der Werte nicht erhöht zu haben.

Im Vergleich zur o.g. Rasteraufnahme zeichnet sich ab, dass der Vorhersagebereich und ein dynamisches Abbruchkriterium aufeinander abgestimmt werden sollten. Möchte man ein moderates Abbruchkriterium nutzen, so sollte der Vorhersagebereich so groß gewählt werden, dass der wahre Wert mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb dieses Bereichs befindlich ist, da sonst das Risiko besteht, dass der Test die Grenze des Vorhersagebereichs als Schwelle ermittelt.

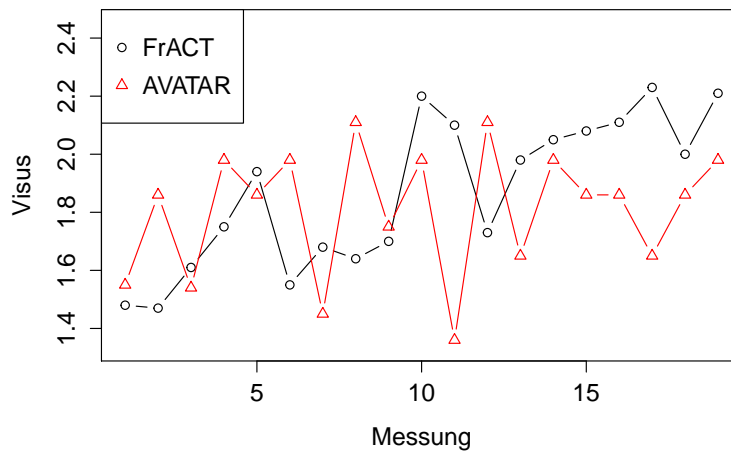


Abbildung 4.8.: Messverlauf Testperson 1(Tabelle E.3)

4.2. Messungen mit Gleitsichtglas

Um erste Aufnahmen beim Blick durch ein Gleitsichtglas zu machen, wird der Test an einem Beamer mit HDMI-Auflösung durchgeführt. Dieser wird auf eine Projektionsbreite von 1,2 m eingestellt. Auf diese Weise kann in 3 m Entfernung ein horizontaler Winkel von $\pm 10^\circ$ getestet und gleichzeitig ein maximaler Visus von 1,4 angezeigt werden.

Die Messungen werden an einem Gleitsichtbrillenträger, dessen Gleitsichtbrille eine Addition von +2 dpt¹ aufweist, durchgeführt.

Die Testeinstellungen werden, auf Grundlage der in den Vergleichsmessungen gemachten Beobachtungen, so gewählt, dass die Optimierungsmaßnahmen keinen negativen Einfluss auf die Testergebnisse haben sollten. So bleiben die Vorkenntnisse deaktiviert und es wird ein sehr striktes Abbruchkriterium von fünf Wiederholungen innerhalb eines Konfidenzintervalls von ± 0 eingestellt.

Die Messungen werden monokular, mit einem abgedeckten Auge, durchgeführt. Um den für die Untersuchung des Gleitsichtglases interessanten Bereich des Progressionskanals möglichst zentral in's Bild zu bekommen, wird dem Proband vor

¹ Dioptrien

4. Messungen

Messbeginn das Messraster dargeboten und er wird angewiesen den Kopf so weit zu heben, bis das zentrale (blau hervorgehobene) Kreuz gerade noch scharf erkennbar ist. So sollte der Proband nun durch den Eintrittspunkt des Progressionskanals auf die Mitte der Projektionsfläche schauen. Er wird angewiesen diese Kopfhaltung im Testverlauf möglichst nicht zu verändern.

Der Abstand der Rasterpunkte wird zunächst auf 7° gestellt und es wird in Nullblickrichtung zentriert. So entsteht ein Raster von 2×3 Punkten im Bereich des Eintrittspunkts des Progressionskanals.

Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Die gemessenen Sehschärfen liegen zwischen 0,2 und 1,2 und es ist erkennbar, dass die Sehschärfe von oben nach unten abnimmt. Es ist allerdings keine eindeutige Kanalstruktur zu erkennen.

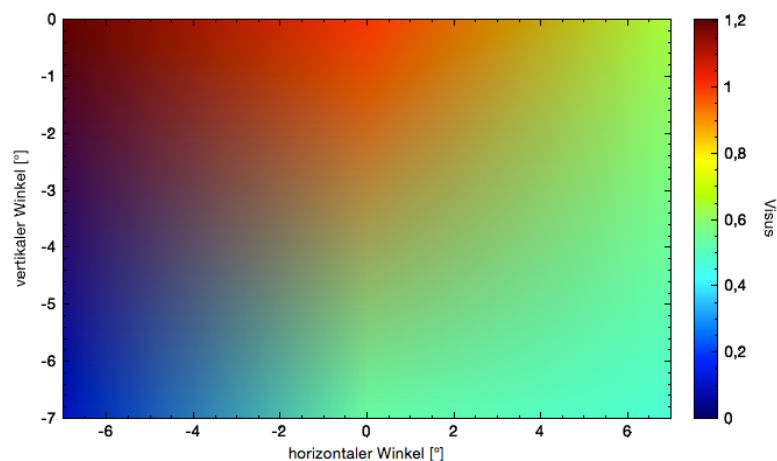


Abbildung 4.9.: Eintrittspunkt des Progressionskanals (Screenshot aus AVATAR)

Da der Stärkenverlauf im Bereich des Kanaleintrittspunkts horizontal noch relativ gering ist, kann es sein, dass der Proband die Mitte des Kanals, bei der gewählten Vorgehensweise, nicht genau finden konnte. Für die nächste Messung wird dem Probanden zusätzlich eine Kontaktlinse mit -1 dpt aufgesetzt, sodass er, auch auf die Distanz von 3 m, im Zentrum des Kanals scharf sehen kann. So kann der Testaufbau beibehalten werden, bei gleicher Anweisung sollte der Proband allerdings durch die Mitte des Progressionskanals schauen.

4.2. Messungen mit Gleitsichtglas

Da hier sowohl der Bereich oberhalb als auch unterhalb des Zentrierpunkts interessant ist, wird das Raster für diese Aufnahme an der Bildschirmmitte zentriert und ein Messpunkt Abstand von 5° eingestellt. Das so entstandene Raster hat 15 (3x5) Messpunkte und das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

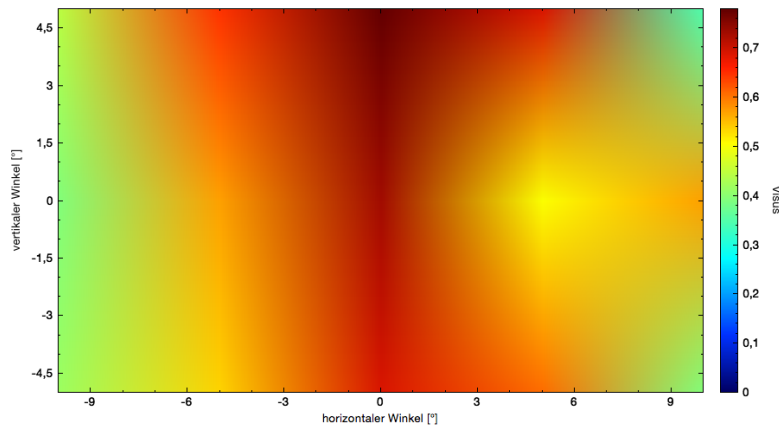


Abbildung 4.10.: Messung im Progressionskanal (Screenshot aus AVATAR)

Das Konturdiagramm zeigt einen Sehschärfeverlauf, der sich gut mit dem Stärkenverlauf im Bereich des Progressionskanals eines Gleitsichtglases (vgl. Abschnitt 2.1 „Stärkenverlauf eines Gleitsichtglases und sein Einfluss auf die Sehschärfe“ (S. 5)) erklären lässt. Horizontal nimmt die Sehschärfe in beide Richtungen ab, während sie vertikal bei $\pm 5^\circ$ kaum Veränderungen aufweist. Beim Blick durch das Zentrum des Kanals scheint die Sehschärfe bei Blicksenkung schon leicht zu fallen (Nebelung durch Addition). Diese Veränderung ist allerdings nur sehr gering und könnte auch durch die, in den Vergleichsmessungen beobachtete, Streuung der Testergebnisse zufällig entstanden sein.

Die Gesamtdauer der Rasterermittlung beträgt 15 Minuten. Die Dauer der Visuermittlung je Messpunkt ist in Abbildung 4.12 und die Zahl der Darbietungen je Messpunkt ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

Es kann erkannt werden, dass das zeitliche Muster, dem Muster der Darbietungszahlen sehr ähnelt. Durch die Einstellung eines strikten Abbruchkriteriums und den Verzicht auf einen bevorzugten Visusbereich ist die Zahl der Darbietungen und

4. Messungen

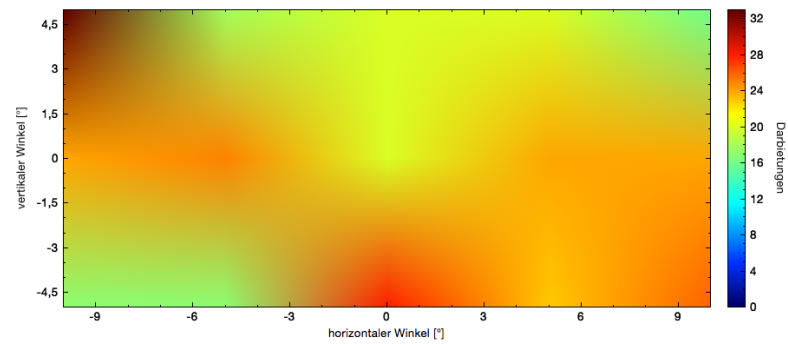


Abbildung 4.11.: Zahl der Darbietungen (Screenshot aus AVATAR)

die Messzeit relativ hoch.

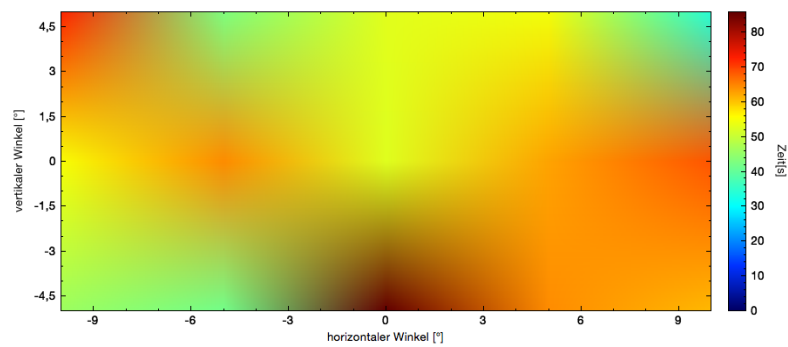


Abbildung 4.12.: Zeitverteilung (Screenshot aus AVATAR)

5. Schluss

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte ein Programm entwickelt werden, das die Darbietung von Sehzeichen an verschiedenen Positionen über ein Raster ermöglicht.

Erste Tests zeigen, dass es, auch ohne ausgefeiltere technische Hilfsmittel, möglich ist, einen Sehschärfeverlauf zu messen, der gut mit dem Stärkenverlauf in einem Gleitsichtglas in Einklang gebracht werden kann.

Durch die Beschreibung und Erklärung der zugrunde liegenden Funktionsprinzipien und die Quelltextdokumentation, soll auch der Einstieg in die Programmierung für die Weiterentwicklung des Programms erleichtert werden.

Die Sehschärfeermittlung erfolgt auf Grundlage eines Maximum-Likelihood-Algorithmus, der sich an dem im FrACT eingesetzten best PEST-Algorithmus orientiert. Darüber hinaus wird dem Nutzer die Möglichkeit gegeben, viele Testparameter selbst zu beeinflussen. So kann er beispielsweise alle Parameter, der dem PEST-Algorithmus zugrunde liegenden psychometrischen Funktion, selbst festlegen.

Hinsichtlich Optimierungsmaßnahmen konnten einige Möglichkeiten aufgezeigt werden, mit denen der Testablauf, unter Einbeziehung von Vorkenntnissen weiter verkürzt werden kann. Einige Optimierungsmaßnahmen konnten bereits im Programm umgesetzt werden und es konnte gezeigt werden, dass man die Darbietungszahl pro Messpunkt durch die Maßnahmen deutlich verkürzen kann.

Die Maßnahmen zur Verkürzung der Darbietungszahl je Messpunkt erfordern die Definition eines Vorhersagebereichs, der in der aktuellen Programmversion nicht individuell für jeden Messpunkt festgelegt werden kann. Hier könnten Untersuchungen, die sich mit dem Zusammenhang zwischen Glasstärke und Visus befassen (vgl. Wederz 2006) zur weiteren Optimierung herangezogen werden.

5. Schluss

Darüber hinaus kann der Prüfer auch über die Auswahl von Ausdehnung, Punktabstand und Art der Rasterpunktberechnung Einfluss auf die Testdauer und die Auflösung des ermittelten Rasters nehmen.

Des Weiteren ist hervorzuheben, dass die gemessenen Raster ohne jegliche Fixierung des Kopfes oder Headtracking gemacht wurden und die Zuordnung der Blickrichtung so nur grob möglich ist.

Wie beschrieben stellt schon die Eingabe der Antworten durch den Probanden über eine Tastatur eine Herausforderung dar, da dieser den Kopf gleichzeitig möglichst nicht bewegen sollte. Diesbezüglich wurden Maßnahmen getroffen, die die Eingabe vereinfachen sollten. Möchte man die Sehzeichen individuell anpassen, so dürfte dies die Eingabe über eine Tastatur zusätzlich erschweren, insbesondere, wenn die Sehzeichen sich nicht in der Orientierung unterscheiden bzw. mehr Sehzeichen zum Einsatz kommen sollen.

Durch die Einbindung eines Headtrackingsystems könnten die Sehzeichen bei Kopfbewegungen mit verschoben werden, wodurch der Proband seinen Kopf frei bewegen könnte, ohne dass die Genauigkeit der Blickwinkelzuordnung darunter leiden müsste.

Zusätzlich könnten mit einem solchen System große Blickwinkel getestet werden, ohne dass das Anzeigemedium alle Blickwinkel gleichzeitig abdecken müsste. Somit könnten Bildschirme mit wesentlich geringerer Auflösung verwendet und die Problematik der Darstellung von Sehzeichen bei schrägem Blick auf eine Fläche reduziert werden.

Eine einfachere Eingabe der Probandenaussagen durch den Probanden selbst könnte über ein Spracherkennungssystem realisiert werden. So könnte der Proband das Sehzeichen einfach benennen ohne den Kopf bewegen zu müssen.

Teil III.

Anhang

A. Inhalt der CD

- Der Quellcode des Programms
- Die Quellcodedokumentation im .html-Format
- Je eine für Mac und Windows 7 erstellte Version des Programms (Abschnitt B „Installationsanleitung“ (S. XVII))
- Eine Version dieses Dokuments im PDF-Format
- Das Poster zum Projekt
- Die in diesem Dokument mit Geo gekennzeichneten Grafiken als dynamische Grafiken im html-Format

B. Installationsanleitung

Auf der beiliegenden CD befindet sich im Ordner Standalone je ein Verzeichnis in dem sich die in Windows7 und die auf dem Mac (Yosemite) erstellte Version des Programms befinden. Diesen Ordnern wurden alle verwendeten Qt-Bibliotheken beigelegt, so dass es genügen sollte den Inhalt des entsprechenden Ordners an die gewünschte Stelle zu kopieren und das Programm auszuführen.

Sollte das Programm auf diese Weise nicht starten oder auf einem anderen Betriebssystem gestartet werden, so kann es alternativ auch mit dem auf der *Qt-Project Homepage* (2014) erhältlichen Qt-Creator direkt aus dem auf der CD befindlichen Quellcode erstellt werden. Hierfür wird die *.pro-Datei im Quellcode-Ordner im Creator geöffnet und das Projekt ausgeführt.

C. Berechnung des Ebenenrasters

Aus Abbildung 2.13 ist ersichtlich, dass sich die Winkel wie folgt aus den kartesischen Koordinaten ermitteln lassen:

$$\sin(\alpha_h) = \frac{\Delta y}{|\vec{v}|} \quad (\text{C.1})$$

$$\sin(\alpha_v) = \frac{\Delta z}{|\vec{v}|} \quad (\text{C.2})$$

Diese Winkel müssen vom Programm verändert und wieder in kartesische Koordinaten umgewandelt werden. Dafür wird zunächst nur ein Winkel berücksichtigt und die Gleichung so aufgestellt, dass die horizontale Drehung über die Größe der y-Komponente und die vertikale Drehung über die Größe der z-Komponente beschrieben werden können. Durch diese Vorgehensweise zeigt der Vektor immer in eine Ebene.

$$(C.1) \Rightarrow \sin(\alpha_h) = \frac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}} \quad (\text{C.3})$$

$$\Delta y = \sin(\alpha_h) \cdot \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (\text{C.4})$$

$$\Delta y^2 = \sin^2(\alpha_h) \cdot (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2) \quad (\text{C.5})$$

$$\Delta y^2 = \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2 + \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta y^2 + \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2 \quad (\text{C.6})$$

$$\Delta y^2 - \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta y^2 = \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2 + \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2 \quad (\text{C.7})$$

$$\Delta y^2 \cdot (1 - \sin^2(\alpha_h)) = \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2 + \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2 \quad (\text{C.8})$$

$$\Delta y^2 = \frac{\sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2 + \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2}{1 - \sin^2(\alpha_h)} \quad (\text{C.9})$$

$$\Delta y = \pm \sqrt{\frac{\sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2 + \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2}{\cos^2(\alpha_h)}} \quad (\text{C.10})$$

C. Berechnung des Ebenenrasters

Analog ergibt sich für Δz :

$$\Delta z^2 = \frac{\sin^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 + \sin^2(\alpha_v) \cdot \Delta y^2}{\cos^2(\alpha_v)} \quad (\text{C.11})$$

$$\Delta z = \pm \sqrt{\frac{\sin^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 + \sin^2(\alpha_v) \cdot \Delta y^2}{\cos^2(\alpha_v)}} \quad (\text{C.12})$$

Soll ein Vektor nun zu beiden Ebenen den entsprechenden Winkel einnehmen, so kann nicht einfach nacheinander Gleichung (C.10) und Gleichung (C.12) angewendet werden, da die Winkel durch alle Komponenten des Vektors beeinflusst werden (vgl. Gleichung (C.3)).

Um den richtigen Winkel in beiden Richtungen zu realisieren, kann in Gleichung (C.11) durch Gleichung (C.9) substituiert werden.

$$(C.9) \text{ in } (C.11) \Rightarrow \frac{\sin^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 + \sin^2(\alpha_v) \cdot \frac{\sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2 + \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2}{\cos^2(\alpha_h)}}{\cos^2(\alpha_v)} \quad (\text{C.13})$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sin^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2}{\cos^2(\alpha_v)} + \frac{\sin^2(\alpha_v) \cdot \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2 + \sin^2(\alpha_v) \cdot \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2}{(\cos^2(\alpha_h)) \cdot (\cos^2(\alpha_v))} \quad (\text{C.14})$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sin^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2}{\cos^2(\alpha_v)} + \frac{\sin^2(\alpha_v) \cdot \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2}{(\cos^2(\alpha_h)) \cdot (\cos^2(\alpha_v))} + \frac{\sin^2(\alpha_v) \cdot \sin^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2}{(\cos^2(\alpha_h)) \cdot (\cos^2(\alpha_v))} \quad (\text{C.15})$$

$$\Leftrightarrow \tan^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 + \tan^2(\alpha_v) \cdot \tan^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2 + \tan^2(\alpha_v) \cdot \tan^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2 \quad (\text{C.16})$$

$$\Leftrightarrow \tan^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 \cdot (1 + \tan^2(\alpha_h)) + \tan^2(\alpha_v) \cdot \tan^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2 \quad (\text{C.17})$$

$$\Rightarrow \Delta z^2 = \tan^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 \cdot (1 + \tan^2(\alpha_h)) + \tan^2(\alpha_v) \cdot \tan^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2 \quad (\text{C.18})$$

$$\Leftrightarrow \Delta z^2 - \tan^2(\alpha_v) \cdot \tan^2(\alpha_h) \cdot \Delta z^2 = \tan^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 \cdot (1 + \tan^2(\alpha_h)) \quad (\text{C.19})$$

$$\Leftrightarrow \Delta z^2 \cdot (1 - \tan^2(\alpha_v) \cdot \tan^2(\alpha_h)) = \tan^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 \cdot (1 + \tan^2(\alpha_h)) \quad (\text{C.20})$$

$$\Rightarrow \Delta z^2 = \frac{\tan^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 \cdot (1 + \tan^2(\alpha_h))}{(1 - \tan^2(\alpha_v) \cdot \tan^2(\alpha_h))} \quad (\text{C.21})$$

$$\Delta z = \pm \sqrt{\frac{\tan^2(\alpha_v) \cdot \Delta x^2 \cdot (1 + \tan^2(\alpha_h))}{(1 - \tan^2(\alpha_v) \cdot \tan^2(\alpha_h))}} \quad (\text{C.22})$$

Analog dazu ergibt sich für Δy :

$$\Delta y = \pm \sqrt{\frac{\tan^2(\alpha_h) \cdot \Delta x^2 \cdot (1 + \tan^2(\alpha_v))}{(1 - \tan^2(\alpha_h) \cdot \tan^2(\alpha_v))}} \quad (\text{C.23})$$

Diese Gleichungen liegen dem Ebenen-Bezugs-Algorithmus zugrunde. (Listing F.3, Zeile 9ff)

D. Abkürzungen

AVATAR Aalener Visual Acuity Test Around Residuum

cc mit Korrektion

dpt Dioptrien

FrACT Freiburg (visual) Acuity & Cotrast Test

Geo Der Index „Geo“ wird in diesem Dokument verwendet um Grafiken zu markieren, die in der dynamischen Geometriesoftware Geogebra (*Geogebra-Homepage* 2015) erstellt und auf der beigelegten CD als dynamische Grafiken (im *.html-Format) abgespeichert wurden.

ML Maximum-Likelihood

OISa Oldenburger Satztest

PD Pupillendistanz

PEST Parameter Estimation by Sequential Testing

sc ohne Korrektion

SITA Swedisch Interactive Threshold Algorithm

E. Tabellen

Messung	FrACT	AVATAR	SCHNELL	Darbietungen
1	0.89	0.65	0.83	10
2	0.78	1.00	0.73	13
3	0.50	0.57	0.50	16
4	0.61	0.69	0.78	7
5	0.66	0.94	0.54	9
6	0.57	0.69	0.57	10
7	0.60	0.69	0.57	10
8	0.87	0.73	0.69	8
9	0.68	0.83	0.65	12
10	0.64	0.65	0.65	12

Tabelle E.1.: Messergebnisse im Selbsttest ohne Sehhilfe

E. Tabellen

Messung	FrACT	AVATAR	RASTER
1	1.94	2.25	2.39
2	2.18	1.98	1.98
3	1.99	2.25	1.64
4	2.21	2.39	1.86
5	2.15	1.98	1.75
6	2.26	2.11	1.86
7	2.59	2.39	1.98
8	2.06	1.78	1.98
9	2.10	1.98	1.86
10	1.96	1.98	1.75
11	2.10	1.98	1.75
12	1.96	2.24	1.75
13	2.06	2.11	1.86
14	1.73	2.24	2.25
15	2.13	1.98	1.98

Tabelle E.2.: Messergebnisse im Selbsttest mit Sehhilfe

Messung	FrACT	AVATAR
1	1.48	1.55
2	1.47	1.86
3	1.61	1.54
4	1.75	1.98
5	1.94	1.86
6	1.55	1.98
7	1.68	1.45
8	1.64	2.11
9	1.70	1.75
10	2.20	1.98
11	2.10	1.36
12	1.73	2.11
13	1.98	1.65
14	2.05	1.98
15	2.08	1.86
16	2.11	1.86
17	2.23	1.65
18	2.00	1.86
19	2.21	1.98

Tabelle E.3.: Messergebnisse Testperson 1

F. Listings

```
#Berechnung des max, moeglichen Visus:
pix <- seq(1920, 7680, length.out = 25) ↵
  ↵ #Auflösung(horizontal) von Anzeigemedien HDMI-8k
deg <- seq(30/2, 60/2, length.out = 25) #Winkel von ±15 bis ↵
  ↵ ±30 Grad
vmax <- function(pixl=pix,degr=deg){
  a<-tan(degr*2*pi/180/2)*2          #groesse der ↵
  ↵ Anzeigeflaeche
  pixg<-a/pixl                      #groesse eines Pixels
  alpha<-2*atan(pixg/2)*180/pi      #Winkel eines Pixels
  v<-1/(alpha*60)                   #visus zu diesem Winkel
  return(v)
}
```

Listing F.1: R-Quellcode zur Berechnung der erzielbaren Sehschärfe abhängig von Auflösung und Blickfeld

```
1 void Visusrechner::setup3D()
2 {
3   ap=QVector3D(dist0,0,(augenhoehe-(phoehe+1.0/2.0*bhoehe))); //ap=Augenposition; ↵
4   ↵ bhoehe= hoehe der Bildflaeche
5   raster_ursprung=QVector3D(0,0,0);
6   if(bino){ //Wenn binokular getestet werden soll
7     ap.setY(0);
8     raster_ursprung.setY(ap.y());
9   }
10  else{
11    if(rechts){ //Wenn das rechte Auge getestet werden soll
12      ap.setY(pd/2);
13      raster_ursprung.setY(ap.y());
14    }
15    else{ //Wenn das linke Auge getestet werden soll
```

F. Listings

```
15 ap.setY(-pd/2);
16 raster_ursprung.setY(ap.y());
17 }
18 }
19 if(rz==NULLBLICK){ //Rasterzentrierung in Nullblickrichtung
20 raster_ursprung.setZ(ap.z());
21 }
22 else{ //sonst wird an der vertikalen Mitte zentriert
23 raster_ursprung.setZ(0.0);
24 }
25 }
```

Listing F.2: setup3D

```
1 QVector3D Visusrechner::aendereRichtung(QVector3D ↵
    ↵ primaerrichtung, QPointF winkel)
2 {
3     qreal alphav, alphah; //vertikaler/horizontaler Winkel
4     qreal eingrad; //die laenge eines Grads auf der ↵
    ↵ Projektionsflaeche unter °°(0,0) Blickwinkel
5     qreal ny,nz;
6     QMatrix4x4 m;
7     QVector3D zielpunkt, richtung=primaerrichtung;
8     zielpunkt.setX(0.0);
9     switch(rt){ //abhaengig davon, welcher Rastertyp ↵
    ↵ eingestellt ist:
10     case EBENEN:
11         alphav=winkel.y();
12         alphav=qDegreesToRadians(alphav);
13         alphah=winkel.x();
14         alphah=qDegreesToRadians(alphah);
15         if(qAbs(alphah)>=M_PI/2){ //ueberpruefen, ob der Winkel ↵
    ↵ innerhalb von ±PI/2 liegt
16         alphah=0;
17         }
18         if(qAbs(alphav)>=M_PI/2){
19             alphav=0;
20             } //Hier passiert die eigentliche Umrechnung
21         ny=qSqrt((qPow(qTan(alphah)*richtung.x(),2)*(1+qPow(qTan(alphav),2)))
22         nz=qSqrt((qPow(qTan(alphav)*richtung.x(),2)*(1+qPow(qTan(alphah),2)))
23         if(alphav<0){ //plusminus Wurzel über Bedingungen:
24             nz=-nz;
25         }
```

```

26     if(alphah<0){
27         ny=-ny;
28     }
29     richtung.setY(ny);
30     richtung.setZ(nz);
31     break;
32 case RECHTECK:
33     eingrad=qTan(qDegreesToRadians(0.5))*richtung.x()*2;
34     zielpunkt.setY(ap.y()+winkel.x()*eingrad);
35     zielpunkt.setZ(ap.z()+winkel.y()*eingrad);
36     richtung=zielpunkt-ap;
37     break;
38 case LAENGENBREITEN: // Fick'sches Modell:
39     alphah=winkel.x();
40     alphav=winkel.y();
41     alphah=qDegreesToRadians(alphah);
42     alphav=qDegreesToRadians(alphav);
43     ny=qTan(alphah)*qAbs(richtung.x());
44     nz=qTan(alphav)*qSqrt(qPow(qTan(alphah)*qAbs(richtung.x()),2)+qPow(qAbs(ric
45     richtung.setY(ny);
46     richtung.setZ(nz);
47     break;
48 }
49 //Hoehenzentrierung:
50 if(rz!=NULLBLICK){
51     alphav=qRadiansToDegrees(qAsin(primaerrichtung.z()/primaerrichtung.length()))
52     m.rotate(-alphav,0,1,0);
53     richtung=richtung*m;
54 }
55 return richtung;
56 }

```

Listing F.3: Bestimmen der Rasterpunkte

Literaturverzeichnis

- Bach, M. (1996), 'The Freiburg Visual Acuity Test-automatic measurement of visual acuity', *Optometry & Vision Science* **73**(1), 49–53.
- Bach, M. (2014), 'Manual of the Freiburg Vision Test 'FrACT', Version 3.9.0'.
Abfragedatum: 2015-01-22.
URL: <http://www.michaelbach.de/fract/index.html>
- Bengtsson, B. & Heijl, A. (1998), 'Sita fast, a new rapid perimetric threshold test. description of methods and evaluation in patients with manifest and suspect glaucoma', *Acta Ophthalmologica Scandinavica* **76**(4), 431–437.
- Berke, A. (2009), *Optometrisches Screening*, DOZ, Heidelberg.
- Diehm, S. (2004), Vergleich der neuen Continous Light Increment Perimetry (CLIP) mit der etablierten 4/2-Eingabelungsstrategie bei Patienten mit glaukomatösen Gesichtsfelddefekten, Dissertation, Medizinische Fakultät, Heidelberg.
- Diepes, H. (2004), *Refraktionsbestimmung*, 3., komplett überarb. Aufl. edn, DOZ-Verlag Optische Fachveröffentlichung, Heidelberg.
- Diepes, H. & Blendowske, R. (2005), *Optik und Technik der Brille: mit 40 Tabellen*, 2. Aufl. edn, Optische Fachveröff., Heidelberg.
- Dietze, H. & Artes, P. H., eds (2008), *Die optometrische Untersuchung*, Thieme, Stuttgart [u.a.].
URL: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz280930046cov.htm>
- DIN 58220-5 (2013-09), 'Sehschärfebestimmung – Teil 5: Allgemeiner Sehtest'.

Literaturverzeichnis

DIN EN ISO 8596 (2009), ‘Augenoptik – Sehschärfeprüfung – Das Normsehzeichen und seine Darbietung’.

Eichhammer, E. (2015), ‘Qcustomplot’.

Abfragedatum 2015-01-20.

URL: <http://www.qcustomplot.com/>

FrACT-Homepage (2015).

Abfragedatum 2015-01-20.

URL: <http://www.michaelbach.de/fract/index.html>

Geogebra-Homepage (2015).

Abfragedatum 2015-01-20.

URL: <http://www.geogebra.org/>

Haslwanter, T. (1995), ‘Mathematics of three-dimensional eye rotations’, *Vision research* **35**(12), 1727–1739.

Klassendokumentation QPaintEngine (2015).

Abfragedatum 2015-01-20.

URL: <http://doc.qt.digia.com/qt-5.1/qtgui/qpaintengine.html>

Lieberman, H. R. & Pentland, A. P. (1982), ‘Microcomputer-based estimation of psychophysical thresholds: the best pest’, *Behavior Research Methods & Instrumentation* **14**(1), 21–25.

Methling, D. (2013), *Bestimmen von Sehhilfen*, 3., vollst. überarb. u. erw. Aufl. edn, Thieme, Stuttgart [u.a.].

URL: <http://d-nb.info/1016446721/04>

Qt-Project Homepage (2014).

Abfragedatum 2014-12-01.

URL: <http://qt-project.org>

Quaia, C. & Optican, L. M. (2003), ‘Three-dimensional rotations of the eye’, *Adler’s physiology of the eye: clinical application*. New York: Mosby pp. 818–29.

R-Project-Homepage (2015).

Abfragedatum 2015-01-20.

URL: <http://www.r-project.org/>

Schiefer, U., Pätzold, J., Wabbels, B. & Dannheim, F. (2006), ‘Konventionelle perimetrie’, *Der Ophthalmologe* **103**(2), 149–165.

Treutwein, B. & Strasburger, H. (1999), ‘Fitting the psychometric function’, *Perception & Psychophysics* **61**(1), 87–106.

van Heesch, D. (2015), ‘Doxygen Homepage’.

Abfragedatum 2015-01-20.

URL: <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>

Wederz, J. (2006), Visusabfall durch das Vorschalten von sphärischen und zylindrischen Brillengläsern bei Myopen, Diplomarbeit, HTW Aalen.

Wesemann, W. (2002), ‘[visual acuity measured via the freiburg visual acuity test (fvt), bailey lovie chart and landolt ring chart].’, *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* (219), 660–7.

Wong, A. M. (2004), ‘Listing’s law: clinical significance and implications for neural control’, *Survey of ophthalmology* **49**(6), 563–575.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Stärkenverlauf eines Gleitsichtglases	5
2.2. Normsehzeichen	8
2.3. Auflösung, Blickwinkel \leftrightarrow Visus	10
2.4. Antialiasing	12
2.5. Die psychometrischen Funktion	13
2.6. 4-2-1 Algorithmus	15
2.7. Likelihood-Prinzip	17
2.8. Likelihoodverlauf mit Korrekturfaktor	18
2.9. Augenrotationen	20
2.10. Beschreibung von Blickrichtungen(Wong 2004, S. 565)	21
2.11. Darstellung eines Fick- und Helmholtzgimbals (Haslwanter 1995, S. 1730)	22
2.12. Isolinien des Fick-Gimbals	22
2.13. Blickrichtungen Ebenenbezug	23
2.14. Auswirkung Falschaussage	26
2.15. Definition eines Vorhersagebereichs	27
3.1. Übersicht AVATAR	31
3.2. Blickwinkel-Raster	35
3.3. Schematische Darstellung der Bestimmung der Rasterpunkte (Listing F.3)	35
3.4. Darstellung der Winkel im Fick-Gimbal (ohne Torsion)	36
3.5. Screenshot einer Messung bei dynamischem Abbruchkriterium mit einer Falschaussage am Anfang	41
3.6. Messverlauf für die ersten vier Darbietungen	41

Abbildungsverzeichnis

3.7. Weiterer Messverlauf	41
3.8. Landoltring mit Antialiasing	44
3.9. Das Hauptfenster des Programms	45
3.10. Die Probandenansicht	47
3.11. Der Sehzeichen-Bearbeitungsmodus	48
3.12. Testeinstellungen (Tab 1)	49
3.13. Testeinstellungen (Tab2 Rastereinstellungen)	50
3.14. Testeinstellungen (Tab2 Schwellenermittlung)	51
3.15. Testeinstellungen (Tab2 Einstellung des kleinsten Details)	51
3.16. Testeinstellungen (Tab3 psychometrische Funktion)	52
3.17. Die Prüferansicht während des Tests erscheint automatisch auf dem Hauptbildschirm	53
3.18. Der Darbietungsverlauf	54
3.19. Die Ergebnisansicht	55
4.1. Tastenzuweisung	57
4.2. Boxplot Selbsttest sc	58
4.3. Boxplot Darbietungen	59
4.4. Boxplot Selbsttest cc	59
4.5. Konturdiagramm Selbsttest	60
4.6. Tastatur mit ertastbaren Orientierungspunkten	61
4.7. Vergleichsmessung Testperson 1	62
4.8. Messverlauf Testperson 1(Tabelle E.3)	63
4.9. Eintrittspunkt des Progressionskanals (Screenshot aus AVATAR) . .	64
4.10. Messung im Progressionskanal (Screenshot aus AVATAR)	65
4.11. Zahl der Darbietungen (Screenshot aus AVATAR)	66
4.12. Zeitverteilung (Screenshot aus AVATAR)	66

Tabellenverzeichnis

E.1. Messergebnisse im Selbsttest ohne Sehhilfe	XXV
E.2. Messergebnisse im Selbsttest mit Sehhilfe	XXVI
E.3. Messergebnisse Testperson 1	XXVII

Listingverzeichnis

3.1. Speichern von Datenobjekten	32
3.2. Bestimmen der individuellen Entfernung	37
3.3. Hinzufügen eines Messwerts	38
3.4. Ermitteln des Maximums	39
3.5. Die Funktion „pruefePlausibilitaet“	40
F.1. R-Quellcode zur Berechnung der erzielbaren Sehschärfe abhängig von Auflösung und Blickfeld	XXIX
F.2. setup3D	XXIX
F.3. Bestimmen der Rasterpunkte	XXX